

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ETAPA IMPULSORA DE UN
AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL DE PEQUEÑA ESCALA ≥ 300 [W] DE
POTENCIA EN EL EJE

Trabajo presentado por:

Juan Sebastián Rivera Cabezas

Director de Proyecto:

Johann Barragán Gómez

Codirector de Proyecto:

Msc. Sergio Andrés Ardila Gómez

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA
2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ETAPA IMPULSORA DE UN
AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL DE PEQUEÑA ESCALA ≥ 300 [W] DE
POTENCIA EN EL EJE

Trabajo presentado por:

Juan Sebastián Rivera Cabezas

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico

Director de Proyecto:

Msc. Johann Barragán Gómez

Codirector de Proyecto:

Msc. Sergio Andrés Ardila Gómez

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA
2019

Nota de Aprobación

Trabajo de grado titulado “Diseño y construcción de la etapa impulsora de un aerogenerador de eje vertical de pequeña escala ≥ 300 [W] de potencia en el eje”, presentado por el estudiante Juan Sebastián Rivera Cabezas para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico.

Firma Jurado.

Firma Jurado.

Firma Director.

Firma Co-Director.

DEDICATORIA

A Dios, parte fundamental de nuestras vidas. A mis padres y mis hermanos por siempre estar ahí para apoyarme en todo momento durante este proceso.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por permitirme llegar a este punto y cumplir este logro en mi vida, a mis padres por siempre creer, confiar y apoyarme durante esta etapa. A todo aquellos que hicieron parte de este proceso especialmente al Profesor Johann por su seguimiento durante el proceso, Álvaro Julián, Don Fernando, Leonel por siempre estar dispuestos a colaborar, a Jonatan compañero de carrera, a mi tío Luis por su apoyo en los últimos años y a todos aquellos que directa o indirectamente hicieron esto posible.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS	13
1.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. INTRODUCCIÓN	14
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. ENERGÍA EÓLICA	16
3.2. CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA	16
3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES SEGÚN LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN	17
3.3.1. MICROTURBINAS (<3kW)	17
3.3.2. PEQUEÑOS AEROGENERADORES (<50kW).....	18
3.3.3. GRANDES AEROGENERADORES (<850kW)	18
3.3.4. AEROGENERADORES MULTIMEGAWATT (1-3MW).....	19
3.4. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES SEGÚN EL NÚMERO DE HÉLICES.....	19
3.4.1. HÉLICES DE UNA PALA	19
3.4.2. HÉLICES DE DOS PALAS	19
3.4.3. HÉLICES DE TRES PALAS	20
3.4.4. HÉLICES MULTIPALAS.....	21
3.5. TIPOS DE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL	21
3.5.1. SAVONIUS	21
3.5.2. DARRIEUS	22
3.5.3. DARRIEUS TIPO H O GIROMILL	23
3.5.4. PROTOTIPO WINDSIDE	24
3.6. COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN	24
3.7. COEFICIENTE DE ARRASTRE	25
3.8. POTENCIA EÓLICA.....	25
3.9. ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA	26
3.9.1. HIDROELECTRICIDAD BOMBEADA	26
3.9.2. ALMACENAMIENTO CON AIRE COMPRIMIDO	26
3.9.3. PILAS DE HIDRÓGENO	26
3.10. AERODINÁMICA.....	26
3.10.1. PERFIL AERODINÁMICO	26
3.10.2. BORDE DE ATAQUE (LEADING EDGE).....	27

3.10.3.	CUERDA	27
3.10.4.	BORDE DE SALIDA (TRAILING EDGE)	27
3.10.5.	INTRADÓS (UPPER SURFACE)	27
3.10.6.	EXTRADÓS (LOWER SURFACE)	28
3.10.7.	REGIÓN DE CURVATURA MÁXIMA	28
3.10.8.	REGIÓN DE ESPESOR MÁXIMO	28
3.10.9.	FUERZA SOBRE EL PERFIL ALAR	28
3.10.10.	VIENTOS DE SUBIDA Y DE BAJADA	29
3.11.	PERFIL ALAR DU 06-W-200	30
4.	DEFINICIÓN LA GEOMETRÍA DEL AEROGENERADOR	30
4.1.	DISEÑO MECÁNICO	32
4.1.1.	COMPONENTES	32
4.1.2.	ENSAMBLE	34
4.2.	GENERADOR	35
5.	INSTRUMENTACIÓN	36
5.1.	ANEMÓMETRO UNI-T UT363	36
5.2.	ENCODER OPTICO LPD3806	37
5.3.	ARDUINO MEGA	38
6.	CÁLCULOS	39
6.1.	ANÁLISIS ÁLABE 1	39
6.2.	ANÁLISIS ÁLABE 2	40
6.3.	ANÁLISIS ÁLABE 3	43
7.	PROTOTIPO	46
7.1.	BUJES	46
7.2.	ÁNGULOS DE SOPORTE	46
7.3.	BRAZO DE SOPORTE	47
7.4.	ESTRELLA	47
7.5.	TRÍPODE	47
8.	SIMULACIÓN	49
8.1.	BASE TRÍPODE	51
8.1.1.	DETALLES DE LA MALLA	52
8.1.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO	52
8.2.	BRIDA	53
8.2.1.	DETALLES DE LA MALLA	54
8.2.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO	54

8.2.3.	FATIGA.....	56
8.3.	BRAZO DE SOPORTE.....	56
8.3.1.	DETALLES DE LA MALLA.....	57
8.3.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	57
8.3.3.	FATIGA.....	58
8.4.	ESTRELLA.....	59
8.4.1.	DETALLES DE LA MALLA.....	59
8.4.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	59
8.4.3.	FATIGA.....	61
8.5.	EJE.....	
8.5.1.	DETALLES DE LA MALLA.....	62
8.5.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	62
8.5.3.	FATIGA.....	63
8.6.	ÁLABE.....	64
8.6.1.	CARACTERISTICAS DE LA MALLA.....	64
8.6.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	65
8.6.3.	FATIGA.....	67
8.7.	ÁNGULO DE SOPORTE.....	67
8.7.1.	DETALLES DEL MALLADO.....	68
8.7.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	68
8.7.3.	FATIGA.....	69
8.8.	CUÑA.....	69
8.8.1.	DETALLES DEL MALLADO.....	69
8.8.2.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	70
8.8.3.	FATIGA.....	70
8.9.	CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD.....	71
9.	INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA.....	71
9.1.	DIMENSIONES DEL DOMINIO DE SIMULACIÓN.....	71
9.2.	ANÁLISIS DINÁMICO.....	72
9.2.1.	VISTA FRONTAL.....	72
9.2.2.	RESULTADOS A 30 GRADOS.....	73
9.2.3.	POTENCIA INSTANTÁNEA A 30 GRADOS.....	73
9.2.4.	RESULTADOS A 90 GRADOS.....	74
9.2.5.	POTENCIA INSTANTÁNEA A 90 GRADOS.....	75
9.2.6.	RESULTADOS A 120 GRADOS.....	75

9.2.7.	POTENCIA INSTANTÁNEA A 120 GRADOS.....	76
10.	PROTOCOLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	76
11.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	79
11.1.	VELOCIDAD DEL VIENTO	83
11.1.1.	PRUEBA 1.....	83
11.1.2.	PRUEBA 2.....	84
11.1.3.	PRUEBA 3.....	84
11.2.1.	DÍA 1.....	86
11.2.2.	DÍA 2.....	86
11.2.3.	DÍA 3.....	86
11.2.4.	DÍA 4.....	87
11.2.5.	COMPARATIVA DÍAS DE VIENTO	87
11.4.	POTENCIA MECÁNICA	90
12.	PRESUPUESTO	94
13.	CONCLUSIONES	95
14.	BIBLIOGRAFÍA	97
	ANEXOS	101
	ANEXO A PLANOS.....	101
	ANEXO B CONSTRUCCIÓN MOLDE Y PERFIL ALAR.....	113
	ANEXO C CÓDIGO DE LECTURA DE VELOCIDAD	115
	ANEXO D REPORTES ANEMÓMETRO UNI-T UT363.....	116
	ANEXO E PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ENSAMBLE.....	119
	ANEXO F RODAMIENTO YAR 208 – 108 – 2F.....	119

FIGURAS

FIGURA 1. AEROGENERADOR TIPO SAVONIUS ^[12]	22
FIGURA 2. AEROGENERADOR TIPO DARRIEUS ^[17]	23
FIGURA 3. VISTA FRONTAL Y SUPERIOR AEROGENERADOR GIROMILL ^[11]	23
FIGURA 4. PROTOTIPO AEROGENERADOR WINDSIDE ^[1]	24
FIGURA 5. PARTES DE UN PERFIL ALAR ^[24]	28
FIGURA 6. FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL PERFIL ALAR ^[24]	29
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN DE LOS VIENTOS ^[24]	29
FIGURA 8. COMPARACIÓN ENTRE PERFIL DU 06-W-200 Y NACA 0018 ^[26] ...	30
FIGURA 9. MODELO 3D ^[AUTOR]	34
FIGURA 10. VISTA FRONTAL E ISOMÉTRICA DEL ROTOR. ^[AUTOR]	35
FIGURA 11. VISTA FRONTAL E ISOMÉTRICA DEL ESTATOR. ^[AUTOR]	36
FIGURA 12. VISTA FRONTAL E ISOMÉTRICA DEL GENERADOR. ^[AUTOR]	36
FIGURA 13. ANEMÓMETRO BLUETOOTH UNI-T UT363. ^[39]	37
FIGURA 14. ENCODER ÓPTICO LPD3806 ^[40]	38
FIGURA 15. ARDUINO MEGA ADK ^[41]	38
FIGURA 16. DIAGRAMA DE AEROGENERADOR CON UN ÁNGULO θ DE 180 GRADOS. ^[AUTOR]	39
FIGURA 17. DIAGRAMA ÁLABE 1 CON UN ÁNGULO θ DE 180 GRADOS. ^[AUTOR]	39
FIGURA 18. DIRECCIÓN DE LA FUERZA F_D ^[AUTOR]	40
FIGURA 19. COMPONENTE TANGENCIAL DE LA FUERZA F_R ^[AUTOR]	40
FIGURA 20. DIAGRAMA DE ÁLABE 2 CON UN ÁNGULO θ DE 180 GRADOS ^[AUTOR]	41
FIGURA 21. DESCOMPOSICIÓN DE LA VELOCIDAD EN COMPONENTES i Y j ^[AUTOR]	41
FIGURA 22. FUERZA DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN ^[AUTOR]	42
FIGURA 23. DIAGRAMA DE ALABE 3 CON UN ÁNGULO θ DE 180 GRADOS. ^[AUTOR]	43
FIGURA 24. DESCOMPOSICIÓN DE LA VELOCIDAD EN COMPONENTES i Y j ^[AUTOR]	43
FIGURA 25. DIAGRAMA DE ALABE 3 CON UN ÁNGULO θ DE 180 GRADOS. ^[AUTOR]	45
FIGURA 26. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE Y DIAGRAMA CINÉTICO CON UN ÁNGULO θ DE 180 GRADOS ^[AUTOR]	45
FIGURA 27. BUJES DE ALUMINIO ^[AUTOR]	46
FIGURA 28. ÁNGULOS DE ACERO ^[AUTOR]	47
FIGURA 29. BRAZO DE ACERO ^[AUTOR]	47
FIGURA 30. ESTRELLA DE ACERO ^[AUTOR]	47
FIGURA 31. BASE TRÍPODE CON EJE TELESCÓPICO ^[AUTOR]	48
FIGURA 32. ESTRELLA DE ACERO CON ANTICORROSIVO ^[AUTOR]	48
FIGURA 33. PRIMER ENSAMBLE COMPLETO AEROGENERADOR ^[AUTOR]	49
FIGURA 34. MALLADO TRÍPODE ^[AUTOR]	52
FIGURA 35. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE ^[AUTOR]	52
FIGURA 36. ESFUERZOS DE VON MISES PARA BASE TRÍPODE ^[AUTOR]	53

FIGURA 37. MALLADO BRIDA [AUTOR]	54
FIGURA 38. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	54
FIGURA 39. ESFUERZOS DE VON MISES PARA LA BRIDA [AUTOR]	54
FIGURA 40. CICLO DE VIDA [AUTOR]	56
FIGURA 41. MALLADO BRAZOS DE SOPORTE [AUTOR]	56
FIGURA 42. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	57
FIGURA 43. ESFUERZOS DE VON MISES PARA LOS BRAZOS [AUTOR]	57
FIGURA 44. CICLO DE VIDA [AUTOR]	58
FIGURA 45. MALLADO ESTRELLA [AUTOR]	59
FIGURA 46. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	59
FIGURA 47. ESFUERZOS DE VON MISES PARA LA ESTRELLA [AUTOR]	60
FIGURA 48. CICLO DE VIDA [AUTOR]	61
FIGURA 49. MALLADO EJE [AUTOR]	62
FIGURA 50. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	62
FIGURA 51. ESFUERZOS DE VON MISES PARA EL EJE [AUTOR]	63
FIGURA 52. CICLO DE VIDA [AUTOR]	64
FIGURA 53. MALLADO ALABE [AUTOR]	64
FIGURA 54. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	65
FIGURA 55. ESFUERZOS DE VON MISES PARA EL ÁLABE [AUTOR]	65
FIGURA 56. CICLO DE VIDA [AUTOR]	67
FIGURA 57. MALLADO ÁNGULO DE SOPORTE [AUTOR]	67
FIGURA 58. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	68
FIGURA 59. ESFUERZOS DE VON MISES PARA EL ÁNGULO DE SOPORTE [AUTOR]	68
FIGURA 60. CICLO DE VIDA [AUTOR]	69
FIGURA 61. MALLADO CUÑA [AUTOR]	69
FIGURA 62. DETALLES MALLA INDEPENDIENTE [AUTOR]	69
FIGURA 63. ESFUERZOS DE VON MISES PARA LA CUÑA [AUTOR]	70
FIGURA 64. CICLO DE VIDA [AUTOR]	70
FIGURA 65. DOMINIO DE SIMULACIÓN [AUTOR]	72
FIGURA 66. FLUJO DE VIENTO A TRAVÉS DEL AEROGENERADOR [AUTOR]	72
FIGURA 67. TRAYECTORIA DEL VIENTO A 30 GRADOS [AUTOR]	73
FIGURA 68. RESULTADOS SIMULACIÓN [AUTOR]	74
FIGURA 69. TRAYECTORIA DEL VIENTO A 90 GRADOS [AUTOR]	75
FIGURA 70. RESULTADOS SIMULACIÓN [AUTOR]	75
FIGURA 71. TRAYECTORIA DEL VIENTO A 120 GRADOS [AUTOR]	76
FIGURA 72. RESULTADOS SIMULACIÓN [AUTOR]	76
FIGURA 73. UBICACIÓN GEOGRÁFICA LOS SANTOS [42]	78
FIGURA 74. UBICACIÓN GEOGRÁFICA SITIO DE PRUEBAS [42]	79
FIGURA 75. MONTAJE EN CAMIONETA 1 [AUTOR]	80
FIGURA 76. MONTAJE EN CAMIONETA 2 [AUTOR]	80
FIGURA 77. MONTAJE EN BASE CIMENTADA [AUTOR]	81
FIGURA 78. MONTAJE CALIBRACIÓN [AUTOR]	82
FIGURA 79. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL VIENTO TOMA 1 [AUTOR]	84
FIGURA 80. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL VIENTO TOMA 2 [AUTOR]	84
FIGURA 81. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL VIENTO TOMA 3 [AUTOR]	84
FIGURA 82. GRÁFICA DE DATOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO [AUTOR]	85

FIGURA 83. VELOCIDAD DEL VIENTO FEBRERO 6 [AUTOR]	86
FIGURA 84. VELOCIDAD DEL VIENTO FEBRERO 7 [AUTOR]	86
FIGURA 85. VELOCIDAD DEL VIENTO FEBRERO 8 [AUTOR]	87
FIGURA 86. VELOCIDAD DEL VIENTO FEBRERO 9 [AUTOR]	87
FIGURA 87. COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DEL VIENTO [AUTOR]	87
FIGURA 88. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR ETAPA 1 [AUTOR]	88
FIGURA 89. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR ETAPA 2.1 [AUTOR]	89
FIGURA 90. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR ETAPA 2.2 [AUTOR]	90
FIGURA 91. GRÁFICA DE VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR EN LA NOCHE ETAPA 2.2 [AUTOR]	90
FIGURA 92. COMPARATIVA POTENCIA VS VELOCIDAD ETAPA 1 [AUTOR]	92
FIGURA 93. COMPARATIVA POTENCIA VS VELOCIDAD ETAPA 2 [AUTOR]	92

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir la etapa impulsora de un aerogenerador de eje vertical de pequeña escala ≥ 300 [W] de potencia en el eje.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir la geometría de la etapa impulsora del aerogenerador de eje vertical acoplada a una carga mecánica.
- Simular la interacción fluido - estructura durante la fase de arranque y fase estable de la etapa impulsora del aerogenerador.
- Calcular computacionalmente los coeficientes de arrastre, sustentación y potencia de salida en el eje.
- Construir la etapa impulsora de acuerdo con criterios de ingeniería.
- Diseñar el protocolo de pruebas experimentales para validar los resultados de las simulaciones.

2. INTRODUCCIÓN

Según un informe de la Superintendencia de Servicios Públicos, para el año 2012, aproximadamente un 52% del territorio nacional carecía de interconexión. Las principales zonas no interconectadas se encuentran en el sector rural, principalmente en el oriente y sur colombiano y en la región pacífica del Chocó, Nariño y Cauca. La falta de cobertura eléctrica tiene repercusiones directas sobre la calidad de la educación en estas zonas, pues impide el uso de computadores que permitan el acceso a la información y la posibilidad de conectarse con un mundo globalizado. En el país existe un 30% de instituciones educativas oficiales (248 mil niños, niñas y jóvenes en edad escolar) que se encuentran en esta situación. A esta situación grave se suma un millón de familias que carecen del servicio de energía eléctrica en el sector rural. El Gobierno Nacional y la OEI han emprendido el proyecto Luces para aprender para dar solución a esta problemática haciendo pruebas piloto en el departamento del Chocó, utilizando energía fotovoltaica. Sin embargo, dada la dimensión de la situación, se hace necesaria la investigación en la generación de energía a partir de otras posibles fuentes renovables que puedan contribuir a la solución de esta problemática, que se adapten a las diferentes condiciones de la topografía colombiana, y que complementen la solución predominantemente fotovoltaica que se ha implementado hasta el momento. Se debe tener presente que Colombia tiene un gran potencial eólico que ha sido poco aprovechado. La propuesta de este proyecto precisamente pretende lograr la construcción de un generador eólico que pueda ser usado en las diferentes zonas no interconectadas del país.

Los aerogeneradores de eje vertical son dispositivos transformadores de energía que funcionan convirtiendo la energía cinética del viento en energía cinética de rotación por

medio de un mecanismo de rotor dotado con álabes. A su vez esta energía cinética de rotación es convertida en energía eléctrica a través de un generador.

La generación de electricidad a partir de la energía eólica cada vez recibe más atención por los países en todo el mundo, debido al rápido agotamiento de recursos energéticos fósiles. En áreas remotas, los sistemas autónomos de generación de energía eólica de pequeña escala reducen los costos de conexión a la red y evitan las pérdidas de transmisión. En regiones desarrolladas, los sistemas de generación eólica distribuida también conllevan un notable beneficio desde el punto de vista de funcionamiento del sistema, como es el caso del aumento de la fiabilidad del sistema de suministro energético.

El potencial del mercado de los generadores de energía eólica es grande debido a la creciente demanda de energía en los países y regiones en vía de desarrollo. En grandes sistemas de generación eólica, las turbinas de eje horizontal (conocidas por sus siglas en inglés como HAWTs) son las más usadas, al mover generadores de inducción de alta velocidad a través de cajas multiplicadoras. Por otro lado, las turbinas eólicas de eje vertical (conocidas por sus siglas en inglés como VAWTs), son las más viables para sistemas de generación eólica distribuida de pequeña escala en el entorno urbano, donde el espacio reducido, las turbulencias y bajos niveles de ruido son restricciones importantes para tener en cuenta para su emplazamiento. Los tipos de VAWTs incluyen las turbinas tipo Darrieus, H-Darrieus, Savonius, y más recientemente las turbinas tipo Hunt. Una ventaja de las VAWTs comparadas con las HAWTs es que no necesitan ser orientadas hacia la dirección del viento, evitando así el costo e infraestructura de sistemas de orientación. Aprovechando el espacio de la azotea de edificios altos, el requisito estructural de los VAWT puede reducirse considerablemente para una captura de energía dada. Se ha reportado, por ejemplo, que aproximadamente 20% de la

demanda de energía de un edificio alto puede ser proporcionado por VAWTs. La generación en azoteas o tejados utilizando VAWTs, probablemente se convertirá en una importante forma de generación de energía renovable en las regiones urbanas, así como en las zonas aisladas de la red eléctrica, lo que implica el reto de mejorar la eficiencia de este tipo de turbinas eólicas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire al desplazarse de áreas de alta presión hacia áreas de baja presión y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.

En la actualidad, este tipo de energía es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante dispositivos llamados aerogeneradores que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar las turbinas de las centrales termoeléctricas que funcionan a base de combustibles fósiles y son utilizadas para generar energía eléctrica.

3.2. CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA

La conversión de la energía eólica en energía eléctrica se lleva a cabo de la siguiente manera. La energía disponible en el viento es energía cinética, dicha energía es la que choca con las palas del rotor y estas palas la convierten en energía mecánica. El rotor se encuentra conectado al eje, y el par motor en dicho eje puede hacer trabajos mecánicos o generar electricidad.

Dependiendo del diseño aerodinámico de la pala, el viento, al actuar en las palas, produce un levantamiento o un arrastre. En el levantamiento lo que ocurre es que se produce una presión diferente en cada lado de la superficie del rotor, haciendo que el plano aerodinámico se levante. En el arrastre el viento golpea físicamente al rotor y lo arrastra con esa fuerza de choque. En cuanto a eficiencia se prefiere el levantamiento y las máquinas más modernas emplean este principio en su operación. Aun con todo, se sabe que, por la Ley de Betz, como ya se ha explicado con anterioridad, solamente puede aprovecharse el 59,6% de la energía disponible del viento, ya que, si fuera posible la extracción de toda la energía en movimiento del viento, justo detrás de las palas se quedaría una gran cantidad de aire en calma, por lo que bloquearía el acceso de más aire a las palas. Una vez que ya se ha extraído la energía del viento, esta energía mecánica es convertida en energía eléctrica mediante un generador eléctrico, el cual puede ser de muy diversos tipos dependiendo de cómo sea el aerogenerador (según su potencia nominal, su uso, su posición). Por tanto, en esta conversión de energía mecánica a energía eléctrica también habrá unas determinadas pérdidas, las cuales también dependerán del tipo de generador seleccionado.

3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES SEGÚN LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN

3.3.1. MICROTURBINAS (<3kW)

Suelen ser utilizadas en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento. El generador eléctrico que normalmente se utiliza es de imanes permanentes, y no suelen contar con caja multiplicadora entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.

Habitualmente se trata de máquinas de eje horizontal con tres palas y diámetros pequeños (entre 1 y 5 metros) que trabajan a velocidades de rotación elevadas y

generalmente variables. La electricidad que producen está en forma de corriente alterna de frecuencia variable, por lo que ésta es rectificadora, almacenada en baterías y posteriormente se convierte de nuevo en alterna, pero de frecuencia constante mediante un inversor. Finalmente, un transformador es el que se encarga de subir la tensión a la que requiera el servicio.

3.3.2. PEQUEÑOS AEROGENERADORES (<50kW)

También suelen ser utilizados en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento, es decir, cubren una demanda similar a la del grupo anterior, pero teniendo una mayor potencia. Además, también suelen utilizarse para formar sistemas híbridos, es decir, sistemas que combinan la energía eólica con otro tipo de energía como puede ser solar, hidráulica y Diesel. Si la potencia es hasta 10kW el tipo de generador eléctrico sigue siendo de imanes permanentes y sin hacer uso de caja multiplicadora. Sin embargo, para una gama de potencias más alta se introducen cajas de engranajes entre el eje del rotor y el del generador, ya que el generador eléctrico funciona a unas velocidades mucho mayores que las del rotor del aerogenerador.

3.3.3. GRANDES AEROGENERADORES (<850kW)

En este caso, la producción de electricidad ya se inyecta a la red. Suelen ser aerogeneradores rápidos de eje horizontal que cuentan normalmente con tres palas. Sus potencias suelen estar comprendidas entre 200 y 850 kW y sus diámetros entre 25 y 55 metros. Cuentan con cajas de engranajes para aumentar la velocidad y así poder accionar el generador eléctrico y sus palas suelen contar con un sistema de regulación (ya sea activo o pasivo) mediante el que se controla la potencia del rotor en función de la velocidad del viento.

3.3.4. AEROGENERADORES MULTIMEGAWATT (1-3MW)

La electricidad que producen también se inyecta a la red. Son similares a los anteriores en cuanto a cajas de engranajes y sistemas de regulación, sin embargo, sus diámetros son mucho mayores (entre 50 y 90 metros) y su altura suele estar entre 60 y 100 metros.

3.4. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES SEGÚN EL NÚMERO DE HÉLICES

3.4.1. HÉLICES DE UNA PALA

La utilización de una turbina eólica monopala aumenta la velocidad de rotación del rotor y por tanto reduce las masas y costos de los demás elementos como el multiplicador y el generador eléctrico. Además, económicamente hablando el costo es muy pequeño, ya que la fabricación es sencilla y la cantidad de materiales también, por el hecho de contar sólo con una pala.

Sin embargo, estas turbinas requieren un contrapeso para que se compense la única pala, además, el desequilibrio aerodinámico en este modelo es muy grande y causa problemas de fatiga. Otra desventaja es que la velocidad en punta de pala al ser muy alta provoca mucho ruido aerodinámico. Si comparamos este rotor con los rotores tripalas vemos que la velocidad en punta de pala es dos veces mayor en los monopala, por lo que el nivel sonoro resultante es bastante elevado.

3.4.2. HÉLICES DE DOS PALAS

El costo del rotor es menor que en uno tripala, sin embargo, debido a los fluctuantes esfuerzos dinámicos que se originan con esta configuración se requieren dispositivos

especiales para disminuir el estado de carga, lo que eleva finalmente el costo global de la máquina, perdiéndose la ventaja económica respecto a la tripala. Además, en cuanto a vibraciones, los bipala son más sensibles que los tripala, ya que tienen mayores velocidades en punta de pala.

Además, igual que ocurría en los monopala, los bipala poseen la posibilidad de fijarse al cubo del rotor mediante un dispositivo de oscilación, efecto denominado teetering, una especie de bisagra que permite compensar los esfuerzos que provoca la variación del perfil de velocidad del viento con la altura, lográndose un patrón de esfuerzos externos algo más plano a lo largo del área barrida por la pala. Otras ventajas se dan en la fabricación, ya que, si es de poca potencia y con sistema de control Stahl, su fabricación se puede hacer en un único bloque.

3.4.3. HÉLICES DE TRES PALAS

Una de las razones principales para la utilización de tres palas es el momento debido a Coriolis constante, casi nulo, del rotor respecto a los movimientos operacionales alrededor del eje longitudinal de la torre. Todos los rotores con tres o más palas tienen esta propiedad favorable. Por lo que no induce ninguna carga sobre la estructura debido a este fenómeno lo que acontece en una simplificación estructural y reducción en los costos de fabricación.

La característica fundamental de esta configuración es su mayor suavidad de funcionamiento respecto a las anteriores. Los rotores de tres palas tienen velocidades de rotación relativamente bajas, lo son también las de punta de pala, constituyendo una gran ventaja respecto a los monopala y bipala debido a la reducción en el nivel de ruido que esto conlleva.

Así mismo, de manera diferente a las hélices mono y bipala, las de tres palas gozan de una gran aceptación pública en cuanto al impacto visual que ocasionan.

3.4.4. HÉLICES MULTIPALAS

Los rotores multipala, tipo americano, tienen por uso casi excluyente el bombeo de agua. Su elevada fuerza de arranque y su relativo bajo costo los hace muy aptos para accionar bombas de pistón. Se estima que en el mundo existen más de 1.000.000 de molinos de este tipo en operación.

3.5. TIPOS DE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

3.5.1. SAVONIUS

El modelo del rotor Savonius es el más simple. Consiste en un cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S; las partes cóncavas de la S captan el viento, mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento, por lo que girarán en el sentido que menos resistencia ofrezcan. Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando el rendimiento; el sistema queda mejorado separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que exista un flujo de aire. Debido a la resistencia al aire de este tipo de rotor, solo puede ser utilizado a bajas velocidades. Las mejores aplicaciones para este tipo de rotor son de tipo mecánico, como el bombeo de agua (Arbeloa y Zurita, 2002) ^[2].

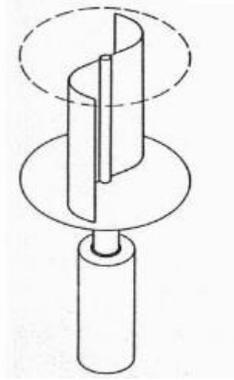


Figura 1. Aerogenerador tipo Savonius ^[12]

3.5.2. DARRIEUS

Este modelo es el más popular de los aerogeneradores de eje vertical. Es creado para evitar la construcción de hélices sofisticadas como las usadas en los aerogeneradores de eje horizontal. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius. Consta de unas finas palas con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje solo por los dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje, al poseer una forma parecida a una cuerda para saltar, hace que los alerones experimenten una fuerte fuerza centrífuga. Este tipo de rotor no puede arrancar por sí mismo, se debe usar un sistema de arranque secundario, pero una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a la aerodinámica de sus palas ^[1]

Estas turbinas tienen alerones verticales de eje recto, los alerones están orientados mecánicamente con el fin de cambiar el ángulo de ataque tal como se ve en la siguiente ilustración:

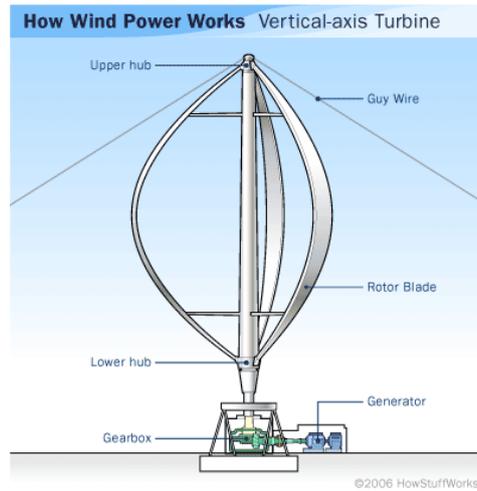


Figura 2. Aerogenerador Tipo Darrieus ^[17]

3.5.3. DARRIEUS TIPO H O GIROMILL

La patente de Darrieus también cubrió las turbinas con alerones verticales de eje recto llamadas Giromill. Una variante del Giromill es la Cycloturbine, con alerones orientados mecánicamente con el fin de cambiar el ángulo de ataque.

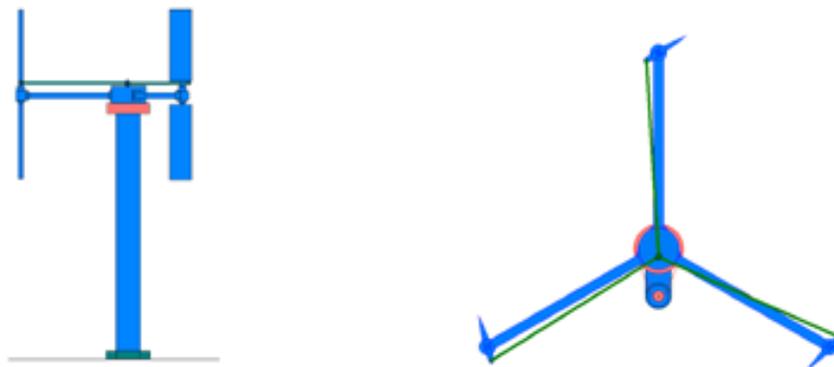


Figura 3. Vista frontal y superior aerogenerador Giromill ^[1]

3.5.4. PROTOTIPO WINDSIDE

Este novedoso aerogenerador de eje vertical es un prototipo concebido por la empresa finlandesa Windside. En la ilustración 4 se puede apreciar un aerogenerador capaz de entregar 50[kW] y que tiene la tarea de climatizar un centro comercial en las cercanías de Turku (Finlandia). Esta tecnología relativamente nueva y prometedora, con rendimientos similares a los aerogeneradores de eje horizontal, es aplicada para abastecer medianos y pequeños consumos. El concepto aerodinámico es lo que lo hace distinto e interesante respecto a los otros VAWT.

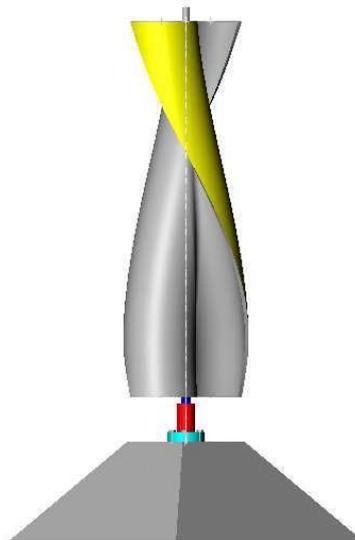


Figura 4. Prototipo aerogenerador Windside ^[1]

3.6. COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN

La sustentación es una fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo.

$$C_d = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \text{ [Adimensional]} \quad \text{[Ecuación 5.6.1]}$$

L es la fuerza de sustentación, ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido, A es el área de referencia del cuerpo o superficie alar, C_L es el coeficiente de sustentación.

3.7. COEFICIENTE DE ARRASTRE

El coeficiente de arrastre es un factor adimensional, el cual cuantifica el arrastre o resistencia que tiene cualquier objeto al ser expuesto a un fluido. Su magnitud depende de la forma física del objeto y su orientación con relación a la corriente del fluido. La expresión que representa el coeficiente de arrastre es:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A} \text{ [Adimensional]} \quad \text{[Ecuación 5.7.1]}$$

Donde F_d es la fuerza de arrastre, que es por definición la componente de la fuerza en la dirección de la velocidad del flujo. ρ es la densidad del fluido, v es la rapidez del objeto relativa al fluido, y A es el área de referencia.

3.8. POTENCIA EÓLICA

$$P_{eolica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \text{ [W]} \quad \text{[Ecuación 5.8.1]}$$

La potencia eólica de una zona se determina mediante la ecuación [3] y ésta depende de la densidad del aire (ρ), de la velocidad del viento (v) y del área barrida por las palas (A).

La potencia que en realidad extrae el aerogenerador de la potencia disponible en el viento se calcula usando el coeficiente de potencia definido por la ecuación [4].

$$C_p = \frac{\text{Potencia mecánica capturada por los álabes}}{\text{Potencia disponible en el viento}} \text{ [adimensional]} \text{ [Ecuación 5.8.2]}$$

El coeficiente C_p puede ser visto como una medida de la eficiencia en la conversión de energía del aerogenerador. Existe un límite teórico en la eficiencia de un aerogenerador determinada por la desaceleración que el viento sufre cuando atraviesa la turbina. Para aerogeneradores de eje horizontal el límite es del 59.6% y recibe el nombre del límite de Lanchester-Betz.

3.9. ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA

3.9.1. HIDROELECTRICIDAD BOMBEADA

Consiste en bombear agua hasta un depósito a cierta altura, almacenando la energía como energía potencial. Se trata del sistema de almacenamiento más desarrollado y comúnmente empleado hasta el momento.

3.9.2. ALMACENAMIENTO CON AIRE COMPRIMIDO

El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire en las horas de menos demanda. En las horas de mayor demanda, sin embargo, el aire se vuelve a expandir, de manera que se genera la energía requerida.

3.9.3. PILAS DE HIDRÓGENO

Esta tecnología se encuentra todavía en investigación, pero parece que podrá tener grandes repercusiones en la industria energética. Se basa en producir hidrógeno empleando el exceso de energía eólica en las horas valle, almacenarlo y liberarlo de nuevo en las horas de mayor demanda en celdas de hidrógeno.

3.10. AERODINÁMICA

3.10.1. PERFIL AERODINÁMICO

En aeronáutica se denomina perfil alar, perfil aerodinámico o simplemente perfil, a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación. Las partes de un perfil son:

3.10.2. BORDE DE ATAQUE (LEADING EDGE)

Es la parte delantera del perfil alar. Se le denomina “borde de ataque” ya que es la primera parte que toma contacto con la corriente de aire, provocando que esta se bifurque hacia el intradós y el extradós. Su forma se define por el radio del borde de ataque. El borde debe ser tangente tanto al intradós como al extradós. El radio de borde de ataque se mide en porcentaje de longitud de la cuerda y define la agudeza del perfil.

3.10.3. CUERDA

Corresponde a la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida. Su valor es una característica particular de cualquier perfil.

3.10.4. BORDE DE SALIDA (TRAILING EDGE)

Corresponde al punto en el que las corrientes de aire provenientes del intradós y extradós confluyen y abandonan el perfil. Aunque en la mayoría de los gráficos se le trace de forma aguda, no siempre suele ser así, teniendo en algunos casos una terminación cuadrada.

3.10.5. INTRADÓS (UPPER SURFACE)

Término genérico que denota la parte interior de una estructura. En un perfil de superficies corresponde a la parte inferior del mismo.

3.10.6. EXTRADÓS (LOWER SURFACE)

Llamado también “trasdós”, es un término genérico que denota la parte exterior de una estructura. En un perfil de superficies corresponde a la parte exterior del mismo.

3.10.7. REGIÓN DE CURVATURA MÁXIMA

Área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa (eje X) del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa de la curvatura máxima.

3.10.8. REGIÓN DE ESPESOR MÁXIMO

Área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa del espesor máximo.

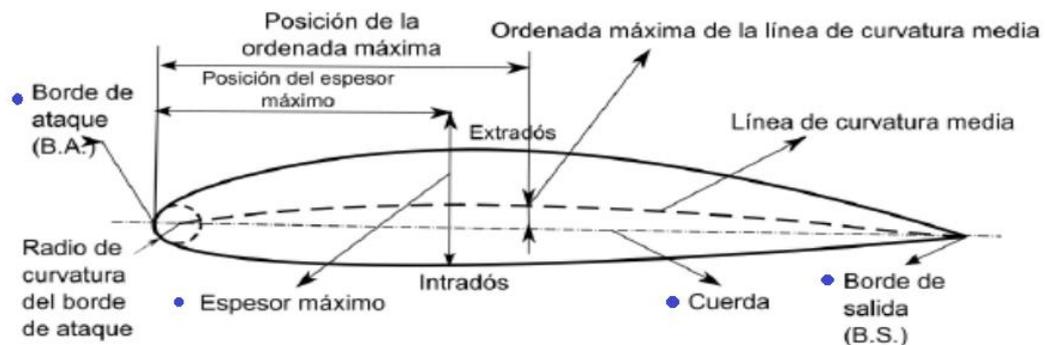


Figura 5. Partes de un perfil alar ^[24]

3.10.9. FUERZA SOBRE EL PERFIL ALAR

Las fuerzas actúan a $\frac{1}{4}$ de la longitud de la cuerda $[A]$ medido desde el borde de ataque. D es la fuerza de arrastre paralela a la dirección del viento. L es la fuerza de sustentación, Perpendicular a la dirección del viento. α ángulo de ataque, se forma entre la cuerda y la entrada del viento U_{∞} .

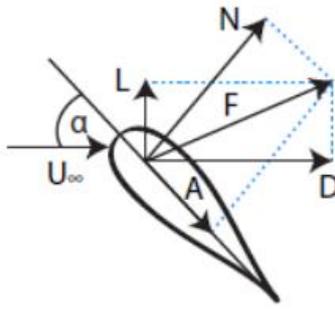


Figura 6. Fuerzas que actúan sobre el perfil alar [24]

3.10.10. VIENTOS DE SUBIDA Y DE BAJADA

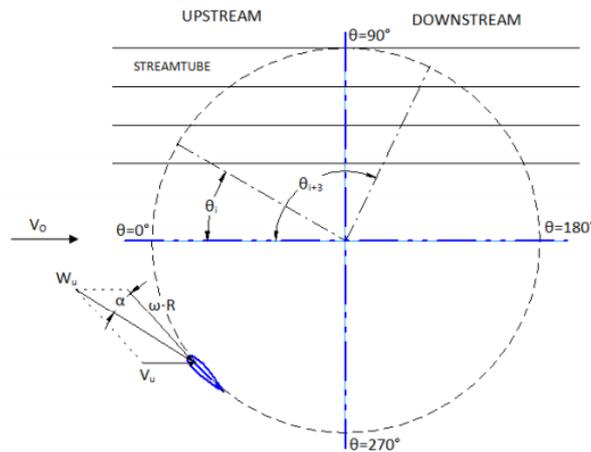


Figura 7. Representación de los vientos [24]

La velocidad del fluido incidente varía, el máximo se encuentra cuando $\theta = 0^\circ$, y el mínimo cuando $\theta = 180^\circ$, donde θ es el azimutal o la posición orbital del aspa. El

ángulo de ataque es el ángulo entre la velocidad del aire incidente, W , y la orientación del aspa. El flujo de aire resultante crea un ángulo de ataque variante, positivo al aspa en la zona corriente arriba de la máquina, cambiando de signo en la zona corriente abajo.

3.11. PERFIL ALAR DU 06-W-200

“DU” hace referencia a la Universidad de Delft, “06” al año de creación 2006, la “W” para la aplicación de turbina eólica y “200” al espesor de 20,0%. Está diseñado para turbinas de pequeña escala con finalidades de uso doméstico. Esta configuración posee la capacidad de auto arranque y a priori respecto a otras configuraciones de perfiles alares lo que evita un detrimento de la energía extraída. [28]

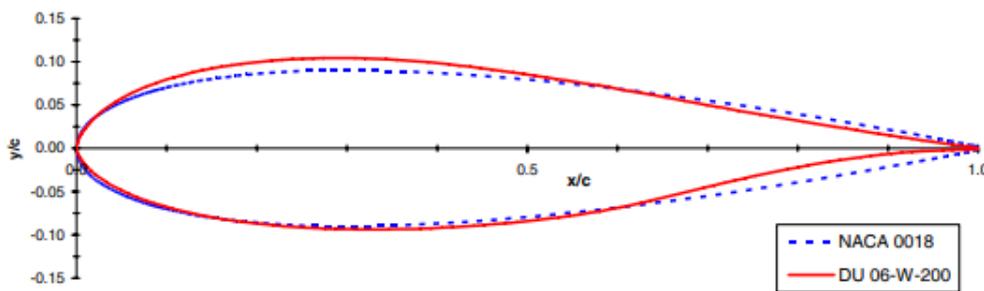


Figura 8. Comparación entre perfil DU 06-W-200 y NACA 0018 [26]

4. DEFINICIÓN LA GEOMETRÍA DEL AEROGENERADOR

Para los álabes del rotor se decide trabajar con la sección transversal DU-06-W-200 pues son más eficientes en la conversión de energía que los perfiles NACA normalmente utilizados en aerogeneradores de eje vertical. [29]

Símbolo	Parámetro	Valor
U	Velocidad del aire libre	10 [m/s]
R	Radio del rotor	1 [m]
c	Cuerda del álabe	0.25 [m]

S	Longitud del álabe	1.5 [m]
N	Número de álabes	3

Tabla 9.1.1 Parámetros de diseño del aerogenerador.

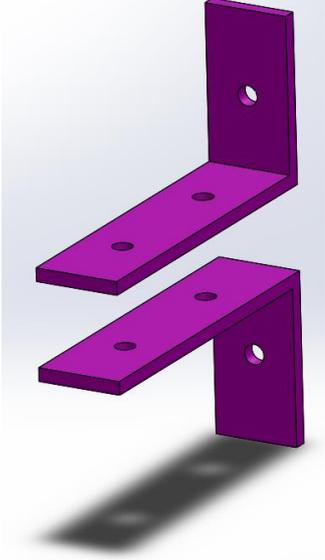
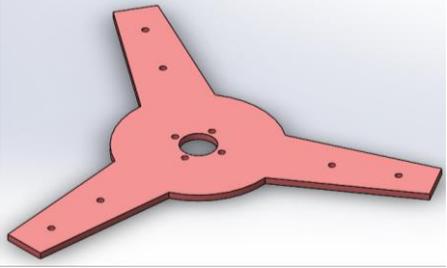
En el diseño del rotor se debe tener en cuenta la razón cuerda-diámetro (c/D) y la relación de aspecto (S/c). Estos parámetros tendrán influencia directa sobre la habilidad de la turbina para poder auto arrancar. Se recomienda trabajar en un valor de razón cuerda a diámetro (c/D) entre 0.12 y 0.14 para permitir que el tiempo de arranque del aerogenerador sea lo menor posible. También se aconseja trabajar con una relación de aspecto entre 5.71 y 16.7, teniendo en cuenta que estos valores también dependen de la elección del perfil alar para la turbina ^[30].

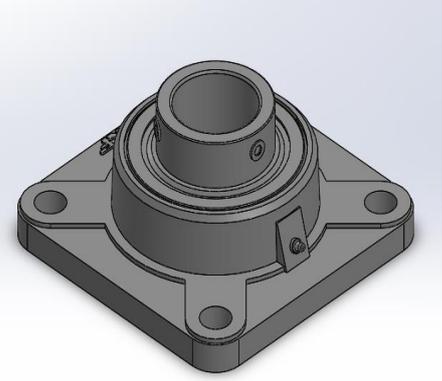
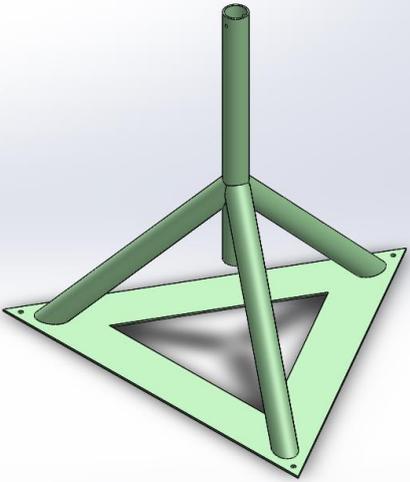
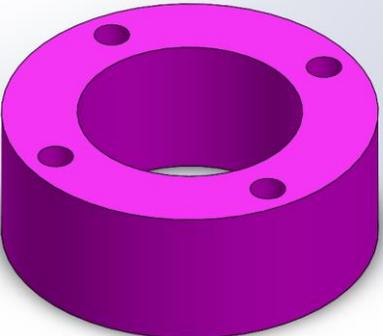
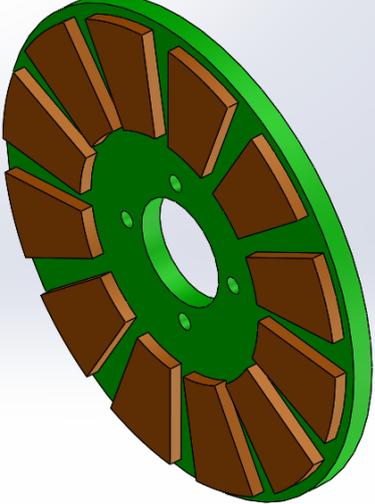
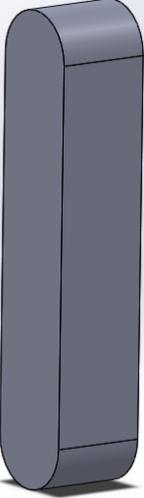
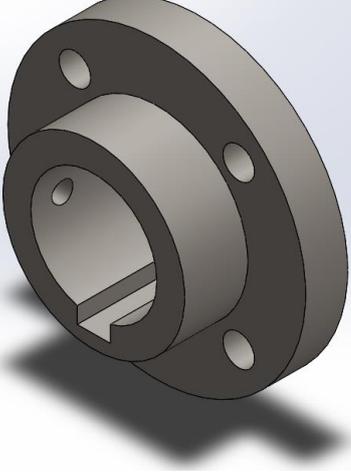
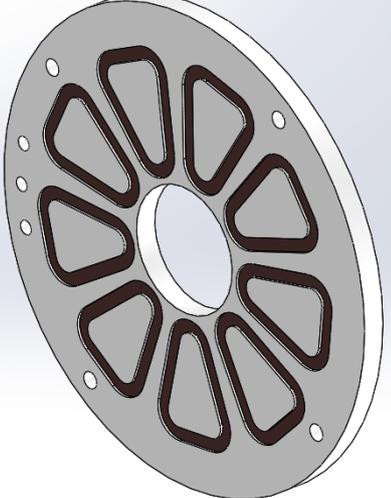
Para estas dimensiones se tiene una razón $c/D = 0.125$ y una relación de aspecto $S/c = 6$. Estos valores se encuentran dentro de los intervalos recomendados para que el aerogenerador cumpla con la condición de autoarranque ^[30].

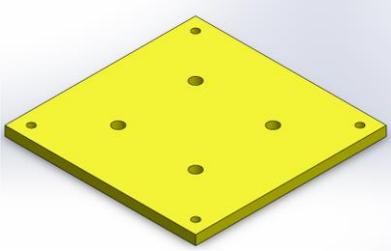
Se toma como referencia constructiva el generador de eje vertical que se propone en Windgenkits. ^[31]

4.1. DISEÑO MECÁNICO

4.1.1. COMPONENTES

		
ÁLABE	SOPORTE BRAZOS - ÁLABE	ESTRELLA

		
<p>BRAZO</p>	<p>CHUMACERA</p>	<p>TRIPODE BASE</p>
		
<p>EJE</p>	<p>BUSHING</p>	<p>ENSAMBLE ROTOR</p>
		
<p>CUÑA</p>	<p>BRIDA</p>	<p>ENSAMBLE ESTATOR</p>

		
EJE BASE	BASE SUPERIOR	BUSHING BRAZOS

4.1.2. ENSAMBLE

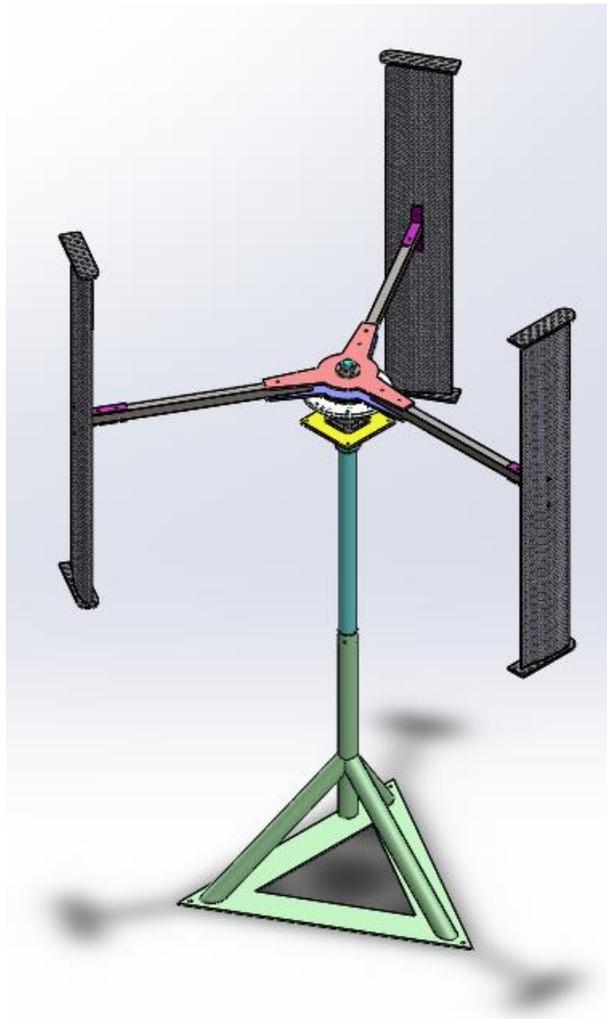


Figura 9. Modelo 3D [AUTOR]

4.2. GENERADOR

Se utilizó como carga mecánica el generador que se usara en la etapa de generación. El generador seleccionado es el de flujo axial de imán permanente, por facilidad en diseño, manufactura, espacio reducido y ausencia de torque resistente. Consta de rotor y estator y se cuenta con el CAD para ambos casos. El rotor está compuesto de 2 discos o láminas de acero con un orificio concéntrico por donde pasará el eje. Dichas láminas tienen una distribución de 24 imanes de neodimio, 12 imanes por disco. Estos imanes van ubicados de forma intercalada teniendo en cuenta su polaridad, norte o sur, las cuales generarán el campo magnético en conjunto con el estator. El estator está hecho en resina y en su interior cuenta con 9 embobinados trapezoidales en cobre lo que permite obtener una longitud activa mayor en comparación con otras posibles formas. Cada bobina cuenta con 70 espiras, las nueve bobinas se conectan a la configuración estrella, la salida se rectifica para generar el voltaje DC. Experimentalmente se ha encontrado que, para un rotor de 9 pulgadas de diámetro, un alambre 15 AWG es un buen tamaño cuando se emplean entre 60 y 80 espiras por bobina ^[31].

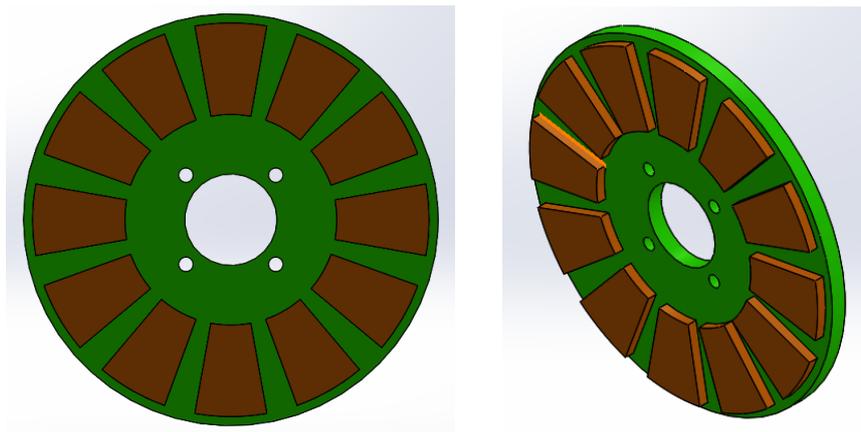


Figura 10. Vista frontal e isométrica del rotor. [AUTOR]

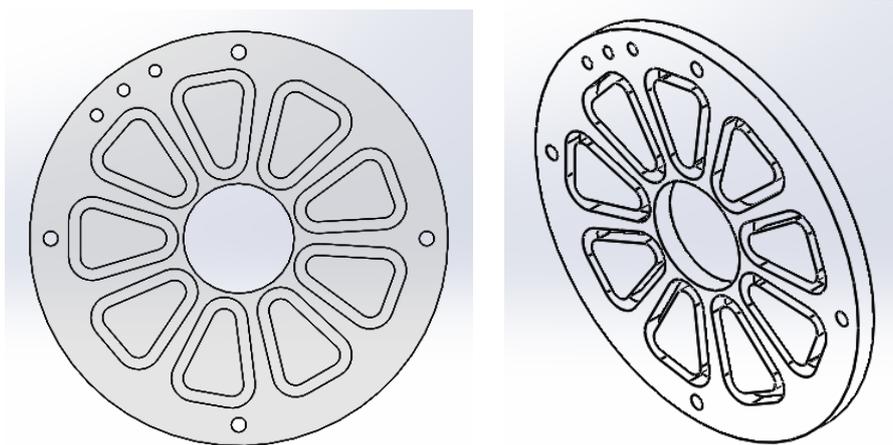


Figura 11. Vista frontal e isométrica del estator. [AUTOR]

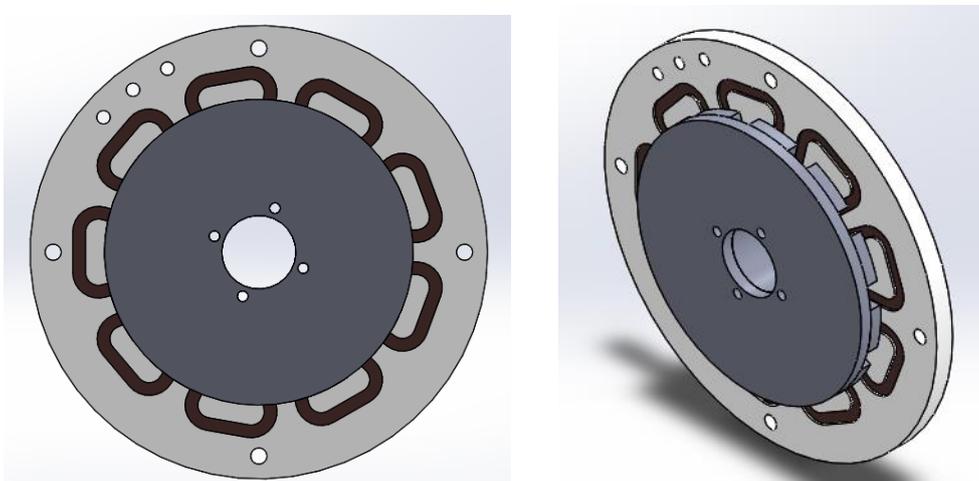


Figura 12. Vista frontal e isométrica del generador. [AUTOR]

5. INSTRUMENTACIÓN

5.1. ANEMÓMETRO UNI-T UT363



Figura 13. Anemómetro Bluetooth UNI-T UT363. ^[39]

CARACTERÍSTICAS

- Medición de la velocidad del aire. El aparato está diseñado para ser usado con rangos de velocidad del aire de entre 0 y 30 metros por segundo y tiene una precisión de $\pm 5\%$.
- Medición de la temperatura del aire. El rango de temperatura admitido es de entre -10 y 50 grados centígrados con una precisión de ± 2 grados centígrados.
- La temperatura también puede ser medida en grados Fahrenheit siendo el rango admitido en este caso es de entre 14 y 122 grados Fahrenheit con una precisión de ± 4 grados Fahrenheit
- Destaca por su gran portabilidad y reducido peso (159g).
- Puedes cambiar entre 5 unidades diferentes de medida.

Es capaz de medir el punto más alto de velocidad del viento y el más bajo, así como los puntos intermedios

- En caso de que debas usarlo de noche o con baja luminosidad posee un botón para retroiluminar la pantalla que es muy práctico. En el caso de que no estés utilizando el anemómetro durante 5 minutos este se apagará automáticamente para ahorrar batería.
- Cuando realizamos una medición y la temperatura está por debajo de 0 grados y la velocidad del aire está por encima de 25 metros por segundo aparece un aviso de frío en la pantalla

5.2. ENCODER OPTICO LPD3806



Figura 14. Encoder óptico LPD3806 ^[40]

- Rendimiento: 600 pulsos / rev.
- Voltaje de funcionamiento: DC 5-24V.
- Velocidad mecánica máxima 5000 rev / min.
- La frecuencia de respuesta eléctrica 20K / sec
- La velocidad integrada 2000 rev / min.

5.3. ARDUINO MEGA

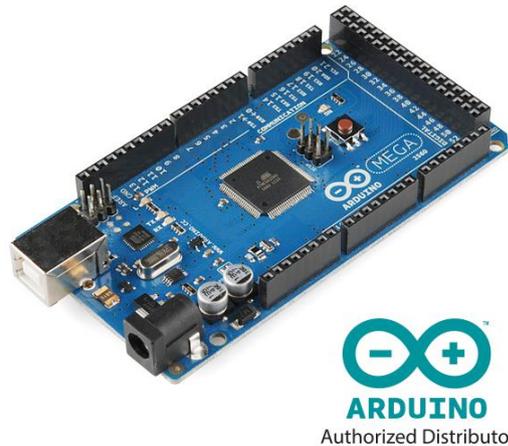


Figura 15. Arduino mega ADK ^[41]

Características:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada de – 7-12V.
- 54 pines digitales de Entrada/Salida.

- 16 entradas análogas.
- 256k de memoria flash.
- Velocidad del reloj de 16Mhz.

6. CÁLCULOS

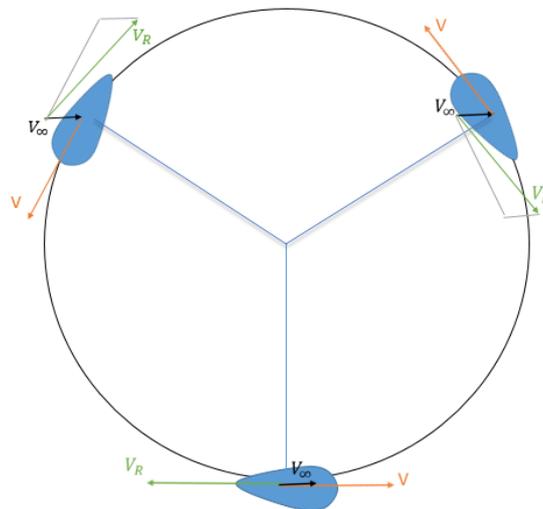


Figura 16. Diagrama de aerogenerador con un ángulo θ de 180 grados. [AUTOR]

$$\vec{V}_R = \vec{v}_\infty - \vec{v}$$

$$\vec{v} = TSR * v_\infty$$

6.1. ANÁLISIS ÁLABE 1

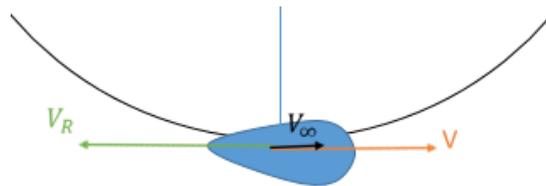


Figura 17. Diagrama álabes 1 con un ángulo θ de 180 grados. [AUTOR]

$$\vec{V}_R = \vec{v}_\infty - \vec{v}$$

$$\vec{V}_R = 10i - (30i)$$

$$\vec{V}_R = -20i$$

$$Re = \frac{\left(20 \frac{m}{s}\right)(0.25m)}{1.5 * 10^{-5}} = 0.33 * 10^6$$

Angulo de ataque = 0°

Interpolando tenemos que para $Re = 0,62 \times 10^6$ y $\alpha=10,80$

$$CL = 0$$

$$CD = 0,0082$$

$$FD = CD * q_{\infty} * S * C$$

$$FD = (0,0082) \left(60,2 \frac{Kg}{ms^2} \right) (1,5m)(0,25m)$$

$$FD = 0,185115[N]$$

FD va en dirección de VR

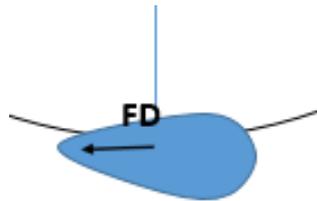


Figura 18. Dirección de la Fuerza FD [AUTOR]

Como $FL = 0$ entonces $FR = -0,185115$ y su componente tangencial será:

$$FT1 = -0,185115 * \text{sen}(90^\circ) = -0,185115 [N]$$

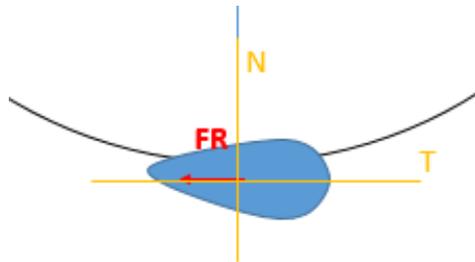


Figura 19. Componente tangencial de la fuerza FR [AUTOR]

6.2. ANÁLISIS ÁLAVE 2

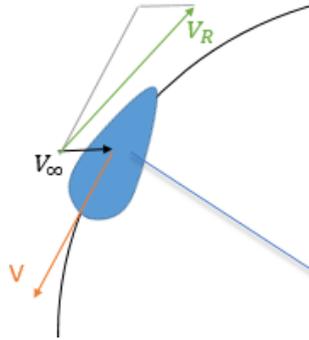


Figura 20. Diagrama de álabe 2 con un ángulo θ de 180 grados [AUTOR]

Con un TSR=3 y una $v_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ reemplazando en la ecuación:

$$V = 3 * 10 \frac{m}{s} = 30 \text{ m/s}$$

Descomponemos v en i y j para hacer la resta vectorial de VR

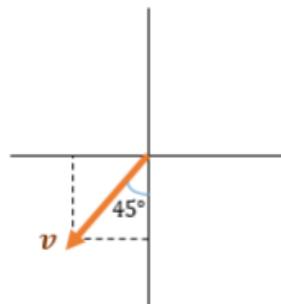


Figura 21. Descomposición de la velocidad en componentes i y j [AUTOR]

$$V = -30 \text{sen}45 i - 30 \text{cos}45 j$$

La v_{∞} sólo tiene componente en i

$$\vec{v}_{\infty} = 10i$$

$$\vec{V}_R = \vec{v}_{\infty} - \vec{v}$$

$$\vec{V}_R = 10i - (-30 \text{sen}45i - 30 \text{cos}45j)$$

$$\vec{V}_R = 31,213i + 21,213j$$

$$|v_{\infty}| = 37.739 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\left(37.739 \frac{m}{s}\right) (0.25m)}{1.5 * 10^{-5}} = 0.63 * 10^6$$

Por tablas se hallan los coeficientes CL y CD que están en función del número de Reynolds y el ángulo de ataque α .

Interpolando tenemos que para $Re = 0,63 * 10^6$ y $\alpha = 10,80$

$$CL = 1,0337 \quad CD = 0,7824$$

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2$$

ρ es la densidad del aire a 20 °C que vale $1,204 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \left(\frac{1,204 Kg}{ms^2} \right) \left(\frac{10m}{s} \right)^2$$

$$q_{\infty} = 60,2 [Pa]$$

$$FL = CL * S * C * q_{\infty}$$

$$FL = (1,0337)(1,5m)(0,25m)(60,2 Kg/ms^2)$$

$$FL = 23,335[N]$$

$$CD = \frac{FD}{q_{\infty} S * C}$$

$$FD = CD * q_{\infty} * S * C$$

$$FD = (0,7824)(60,2 \frac{Kg}{ms^2})(1,5m)(0,25m)$$

$$FD = 17,662[N]$$

La fuerza de arrastre va en dirección a \mathbf{V}_R y perpendicular a ella se ubica la fuerza de sustentación:

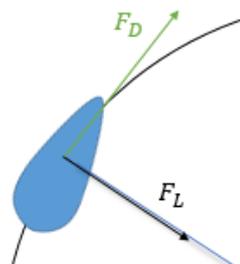


Figura 22. Fuerza de arrastre y sustentación [AUTOR]

Haciendo la suma de estas fuerzas por el método del paralelogramo en SolidWorks obtenemos la FR.

$$F_R = 29.265[N]$$

Se descompone la FR en componentes tangencial y normal.

El ángulo dado por SolidWorks es de $26,32^\circ$ entonces la componente tangencial de FR :

$$F_{T2} = -29.265 \text{sen}(26.32) = -12.975[N]$$

6.3. ANÁLISIS ÁLABE 3

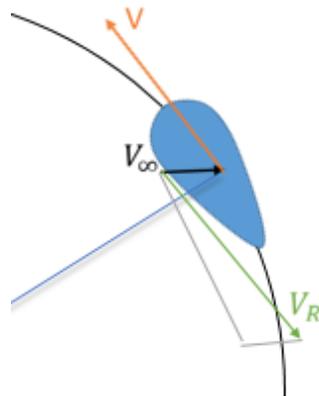


Figura 23. Diagrama de alabe 3 con un ángulo θ de 180 grados. [AUTOR]

Con un $TSR = 3$ y una $v_\infty = 10 \text{ m/s}$ reemplazando en la ecuación:

$$V = 3 * 10 \frac{m}{s} = 30m/s$$

Descomponemos v en i y j para hacer la resta vectorial de VR

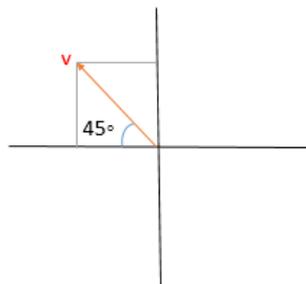


Figura 24. Descomposición de la velocidad en componentes i y j [AUTOR]

$$V = 30\text{sen}45 i + 30\text{cos}45j$$

La v_∞ sólo tiene componente en i

$$\vec{v}_\infty = 10i$$

$$\vec{V}_R = \vec{v}_\infty - \vec{v}$$

$$\vec{V}_R = 10i - (30\text{sen}45i + 30\text{cos}45j)$$

$$\vec{V}_R = -11.213i + 21.213j$$

$$|v_\infty| = 23.905 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\left(23.905 \frac{m}{s}\right)(0.25m)}{1.5 * 10^{-5}} = 0.39 * 10^{-6}$$

Por tablas se hallan los coeficientes CL y CD que están en función del número de Reynolds y el ángulo de ataque α .

Interpolando tenemos que para $Re = 0,39 * 10^6$ y $\alpha = 10,80$

$$CL = 0.9811 \quad CD = 0,0184$$

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2$$

ρ es la densidad del aire a 20 °C que vale 1,204 [kg/m³]

$$q_\infty = \frac{1}{2} \left(\frac{1.204 \text{Kg}}{\text{ms}^2} \right) \left(\frac{10\text{m}}{\text{s}} \right)^2$$

$$q_\infty = 60.2 \text{ [pa]}$$

$$FL = CL * S * C * q_\infty$$

$$FL = (0.9811)(1.5\text{m})(0.25\text{m})(60.2 \text{ Kg/ms}^2)$$

$$FL = 7.3827 \text{ [N]}$$

$$CD = \frac{FD}{q_\infty S * C}$$

$$FD = CD * q_\infty * S * C$$

$$FD = (0.7824) \left(60.2 \frac{\text{Kg}}{\text{ms}^2} \right) (1.5\text{m})(0.25\text{m})$$

$$FD = 0.4153 \text{ [N]}$$

La fuerza de arrastre va en dirección a \vec{V}_R y perpendicular a ella se ubica la fuerza de sustentación:

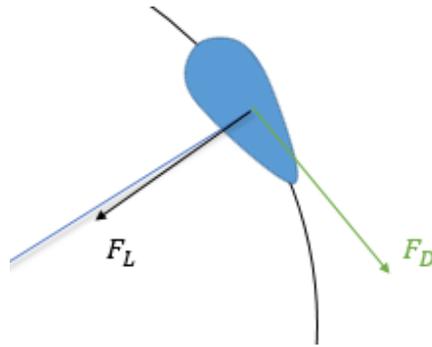


Figura 25. Diagrama de alabe 3 con un ángulo θ de 180 grados. [AUTOR]

Haciendo la suma de estas fuerzas por el método del paralelogramo en SolidWorks obtenemos la FR .

$$F_R = 7.798[N]$$

Se descompone la FR en componentes tangencial y normal.

El ángulo dado por SolidWorks es de 26,32 entonces la componente tangencial de FR :

$$F_{T3} = 29.265 \text{sen}(7.798) = 4.0195[N]$$

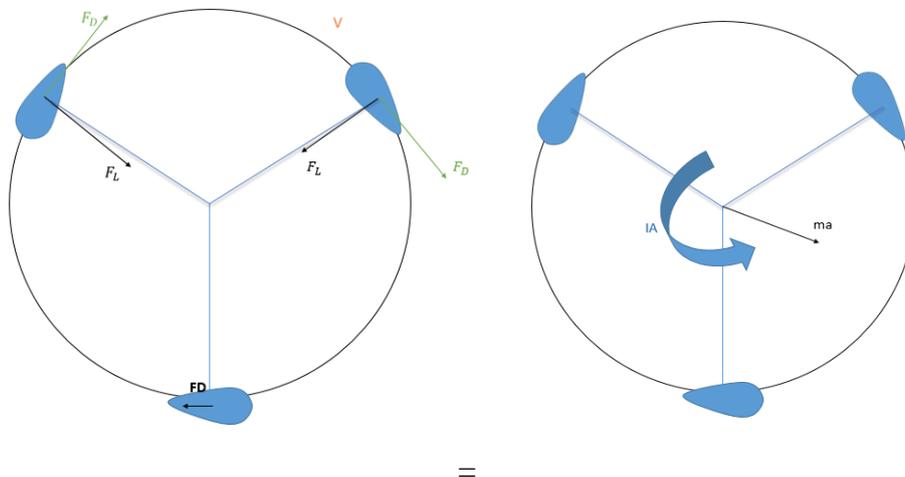


Figura 26. Diagrama de cuerpo libre y diagrama cinético con un ángulo θ de 180 grados [AUTOR]

Ecuaciones del movimiento usando la segunda ley de Newton:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$\sum \vec{M} = I\vec{\alpha}$$

Resolviendo e igualando las sumatorias tenemos que:

$$-T_R + F_{T1} * r + F_{T2} * r + F_{T3} * r = I \alpha$$

Para el cálculo del torque resistente T_R tenemos la siguiente ecuación

$$T_R = 0,5 \mu p d$$

$$\mu = \text{Constante del coeficiente de fricción} = 0,0013$$

$$p = \text{peso}$$

$$d = \text{Diámetro de agujero donde entra el eje}$$

Remplazando en la ecuación de torque resistente tenemos:

$$T_R = (0,5) (0,0013) (395699,103 \text{ N}) (0,019 \text{ m}) = 4,88 \text{ [Nm]}$$

La inercia tomada de SolidWorks es= $43,75 \text{ [Kg * m}^2\text{]}$

Reemplazando con los momentos con las fuerzas tangenciales halladas anteriormente

tendríamos que la aceleración angular es:

$$\alpha = \frac{-T_R + F_{T1} * r + F_{T2} * r + F_{T3} * r}{I}$$

$$\alpha = \frac{-4.88 + 12.975 + 0.85115 + 4.0195}{43.75} = 0.2963 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$$

Nota: Los datos de masa, volumen, superficie, centro de masa, inercias y momentos principales de inercia fueron tomados de SolidWorks [Ver anexo E]

7. PROTOTIPO

7.1. BUJES



Figura 27. Bujes de aluminio [AUTOR]

7.2. ÁNGULOS DE SOPORTE



Figura 28. Ángulos de acero [AUTOR]

7.3. BRAZO DE SOPORTE



Figura 29. Brazo de acero [AUTOR]

7.4. ESTRELLA

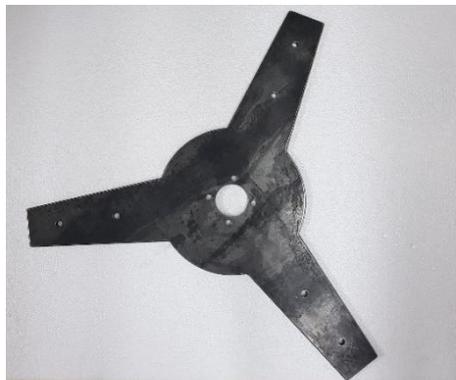


Figura 30. Estrella de acero [AUTOR]

7.5. TRÍPODE



Figura 31. Base trípode con eje telescópico [AUTOR]

A las piezas manufacturadas se les aplico un tratamiento anticorrosivo en aerosol con el fin de protegerlas ya que estarán a la intemperie. En la siguiente imagen se puede observar el acabado final de una de las piezas.



Figura 32. Estrella de acero con anticorrosivo [AUTOR]



Figura 33. Primer ensamble completo aerogenerador ^[AUTOR]

8. SIMULACIÓN

La técnica utilizada para el desarrollo de la simulación fue el análisis por elementos finitos, esta técnica sugiere subdividir el modelo en trozos de formas “simples” conectados en puntos comunes, que predice el comportamiento del modelo mediante la combinación de la información de todos los elementos que conforman el modelo, para esto al modelo se le aplica un mallado que depende de forma directa de la complejidad de la geometría y la calidad de los resultados que se desean. ^[43]

Para cada uno de los casos mostrados se realizaron las correspondientes configuraciones que conciernen específicamente a los análisis mostrados. Inicialmente se definió la independencia de malla, lo que me indica que la respuesta obtenida, en cierto punto, no depende del tamaño ni de la cantidad de elementos que conforman el mallado, adicionalmente se tuvo en cuenta factores claves como costo computacional y tiempo de simulación. Los mallados son iguales tanto para el análisis estático como para el análisis por fatiga.

Se realiza el mallado para cada una de las partes a analizar utilizando Standar Mesh en SolidWorks que se basa en el método Delaunay – Voronoi que consiste en, a groso modo, en una red de triángulos convexa y conexa circunscrita en una circunferencia la cual no debe contener ningún vértice de otro triángulo. A mayor cantidad de triángulos en una superficie mejor captación del fenómeno a simular. Por lo que para cada una de las piezas presentadas en el estudio se realiza un refinamiento de los mallados para calcular una respuesta que no converja ni tenga relación con el número de elementos creados.

Se define la nomenclatura a utilizar en su mayoría constantes para posteriormente realizar el análisis estático en cada uno de los casos, como resultados tendremos las fuerzas que actúan sobre cada elemento. Dichas fuerzas son ingresadas como cargas en la simulación estática de SolidWorks.

ρ = Densidad del aire
 C = Longitud de la cuerda
 Re = Reynolds
 α = Angulo de ataque
 C_L = Coef de sustentacion
 C_D = Coef de arrastre
 v = Velocidad del aire
 μ = Viscosidad dinámica
 u = Viscosidad estática

CONSTANTES DEL PROCESO

$$u[25^{\circ}\text{C}] = 1.562 * 10^{-5} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$$v = 10 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$c = 0.25 \left[\text{m} \right]$$

NÚMERO DE REYNOLDS

$$Re = \frac{\rho * v * l}{\mu} = \frac{v * l}{u}$$

FUERZA DE SUSTENTACIÓN

$$F_L = C_L * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A_L$$

$$F_L = 0.32 \text{ [N]}$$

FUERZA DE ARRASTRE

$$F_D = C_D * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A_D$$

$$F_D = 40.79 \text{ [N]}$$

FUERZA NETA

$$F = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} = F = 40.79 \text{ [N]}$$

INERCIA DEL RODAMIENTO

$$I_{33} = 0.0134664 \text{ [Kg * m}^2\text{]}$$

8.1. BASE TRÍPODE

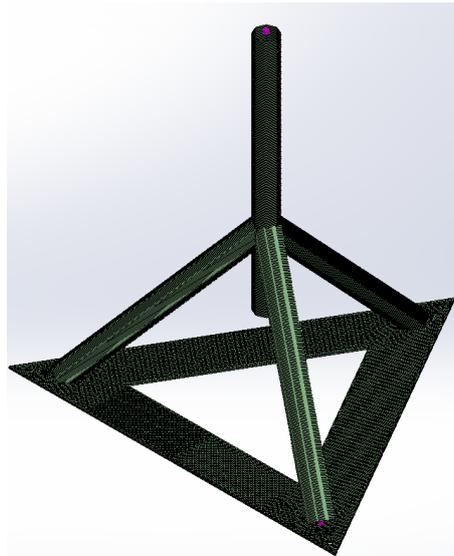


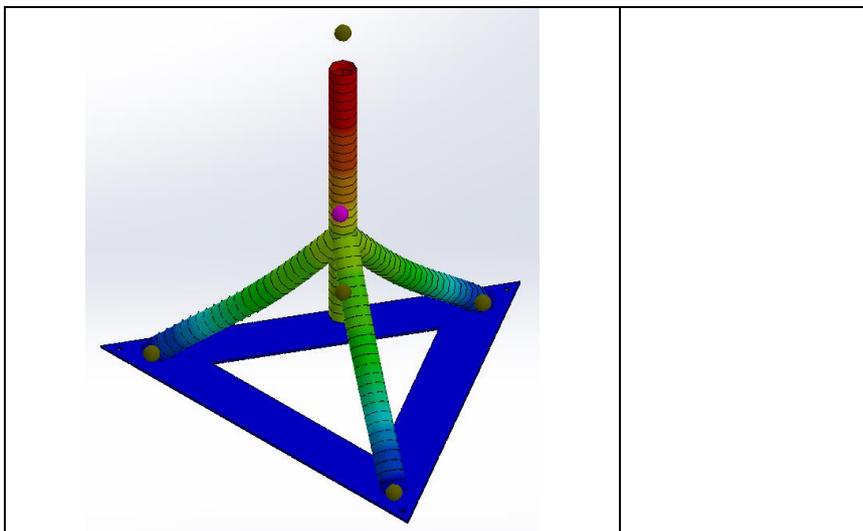
Figura 34. Mallado trípode [AUTOR]

8.1.1. DETALLES DE LA MALLA

Mesh Details	
Study name	Static 1 [-Predeterminado<Como mecanizada>-]
Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Jacobian check for shell	On
Mesh Control	Defined
Element size	3 mm
Tolerance	0.15 mm
Mesh quality	High
Total nodes	1223080
Total elements	782127
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:07:04
Computer name	G75VW-AJGC

Figura 35. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.1.2. ANÁLISIS ESTÁTICO



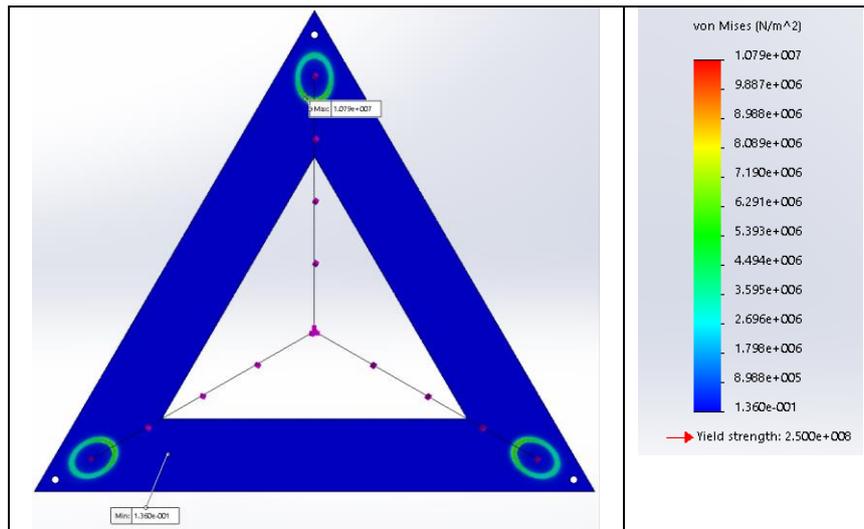


Figura 36. Esfuerzos de Von Mises para base trípode [AUTOR]

En la figura 36 se puede observar la estructura de soporte del aerogenerador la cual está hecha de Acero. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor 1.079+007 en el punto seleccionado en la imagen. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es 2.500e+008 y al hallar el factor de seguridad se encuentra que este soporte puede recibir hasta 23 veces la carga puesta sobre él, con lo cual se concluye que tanto la estructura como el material cumplen su función.

$$F_Y - F_W = 0$$

$$F_Y = 664.2351 [N]$$

8.2. BRIDA

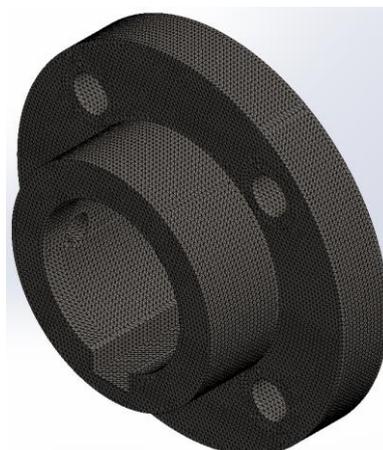


Figura 37. Mallado brida [AUTOR]

8.2.1. DETALLES DE LA MALLA

Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Predeterminado-)
Mesh type	Solid Mesh
Meshes Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	1 mm
Tolerance	0.05 mm
Mesh quality	High
Total nodes	719039
Total elements	506070
Maximum Aspect Ratio	4.8046
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99.9
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:19
Computer name	G75VW-AJGC

Figura 38. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

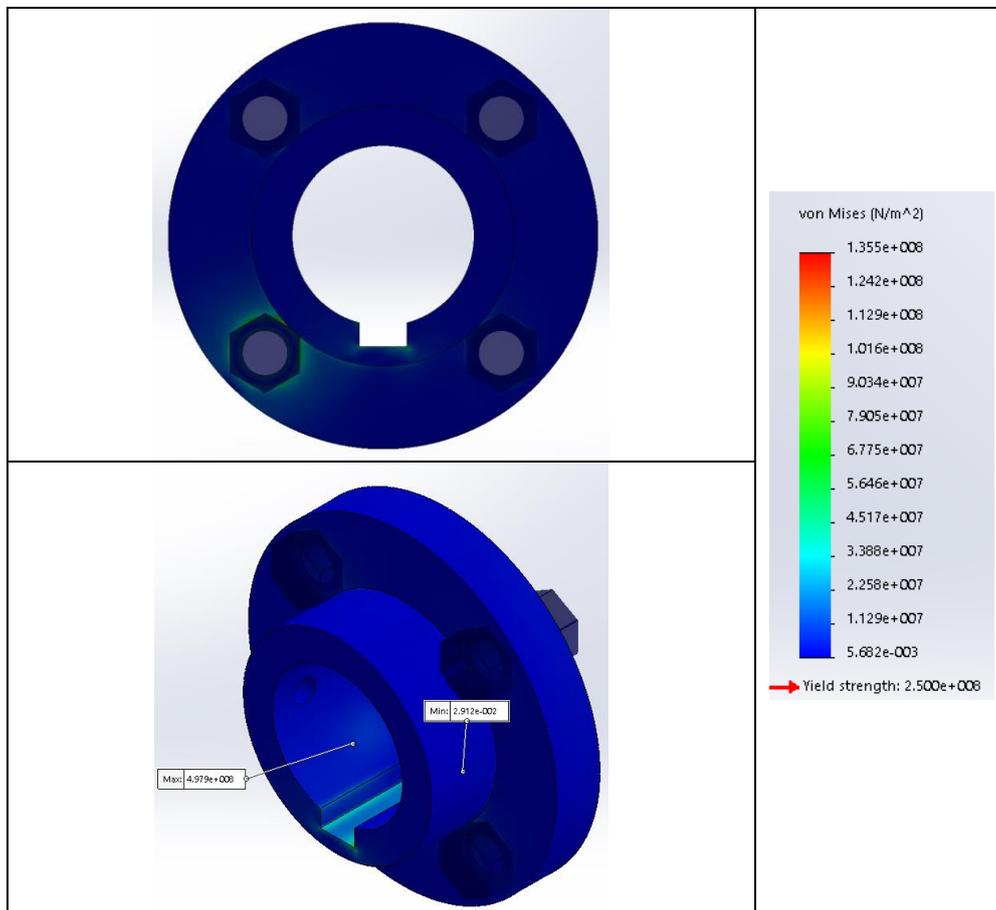


Figura 39. Esfuerzos de Von Mises para la brida [AUTOR]

En la figura 39 se puede observar la brida la cual está hecha de Acero, Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor 1355e+008 en el punto seleccionado en la imagen. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el

material cede que es $2500e+008$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que esta brida puede soportar hasta 1.85 veces la carga puesta sobre ella, con lo cual se concluye que tanto la brida como el material cumplen su función.

SUMATORIA DE FUERZAS

$$\sum F_x = m * a_t$$

$$F_{x3/2} - F_{x4} - F_{Bx} = m * a_t$$

$$\sum F_y = m * a_n$$

$$F_{y3/2} - F_{By} = m * a_n$$

$$\sum F_z = 0$$

$$-F_{z3/2} + F_{z4} + F_{Bz} = 0$$

SUMATORIA DE MOMENTOS

$$\sum M_z = I * \alpha \quad \Rightarrow \quad F_{x4} * d3 + F_{x3/2} * d3 = I * \alpha$$

$$\sum M_{xG} = 0 \quad \Rightarrow \quad F_{z4} * d3 + F_{z3/2} * d3 = 0$$

$$\sum M_{yG} = 0 \quad \Rightarrow \quad F_{z4/2} * d3 - F_{z4/2} * d3 = 0$$

RESOLVIENDO EL SISTEMA DE ECUACIONES

$$F_{Bx} = -16.791 [N]$$

$$F_{By} = -20710.155 [N]$$

$$F_{Bz} = 0 [N]$$

$$F_{x4} = -8.3879 [N]$$

$$F_{z4} = -11.6835 [N]$$

8.2.3. FATIGA

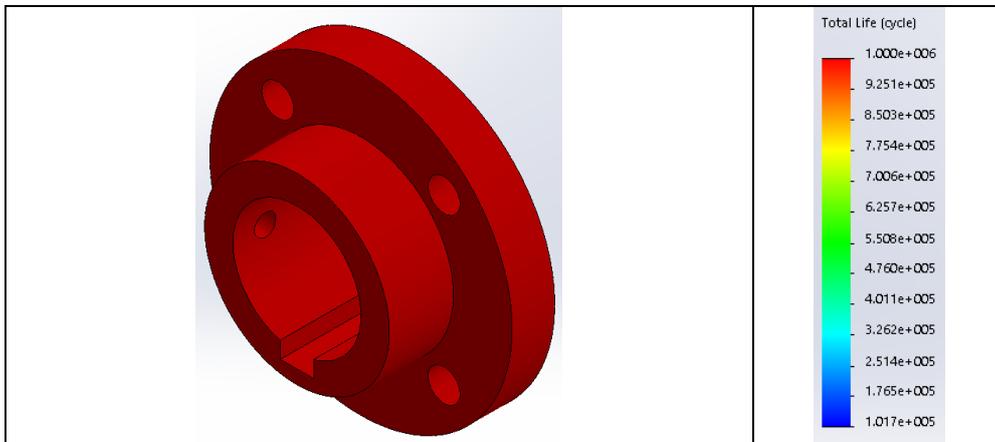


Figura 40. Ciclo de vida [AUTOR]

Utilizando los esfuerzos mínimos y máximos calculados en el análisis estático, se realiza el estudio por fatiga y se calcula la vida del elemento. Se utiliza la curva S-N definida por SolidWorks en la biblioteca de materiales, la S hace referencia a la tensión aplicada y N al número de ciclos. Dicha gráfica viene en escala logarítmica y se encuentra por defecto en SolidWorks. Los resultados muestran que puede llegar a $1.00 e^6$ de ciclos.

8.3. BRAZO DE SOPORTE

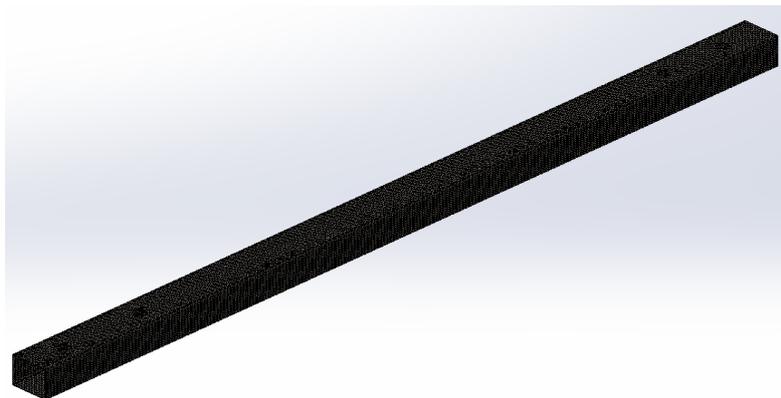


Figura 41. Mallado brazos de soporte [AUTOR]

8.3.1. DETALLES DE LA MALLA

Mesh Details	
Study name	Static 1 (Predeterminado-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	3 mm
Tolerance	0.15 mm
Mesh quality	High
Total nodes	188910
Total elements	94376
Maximum Aspect Ratio	15.606
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	27.5
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.00954
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:01:06
Computer name	G75VW-AJGC

Figura 42. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.3.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

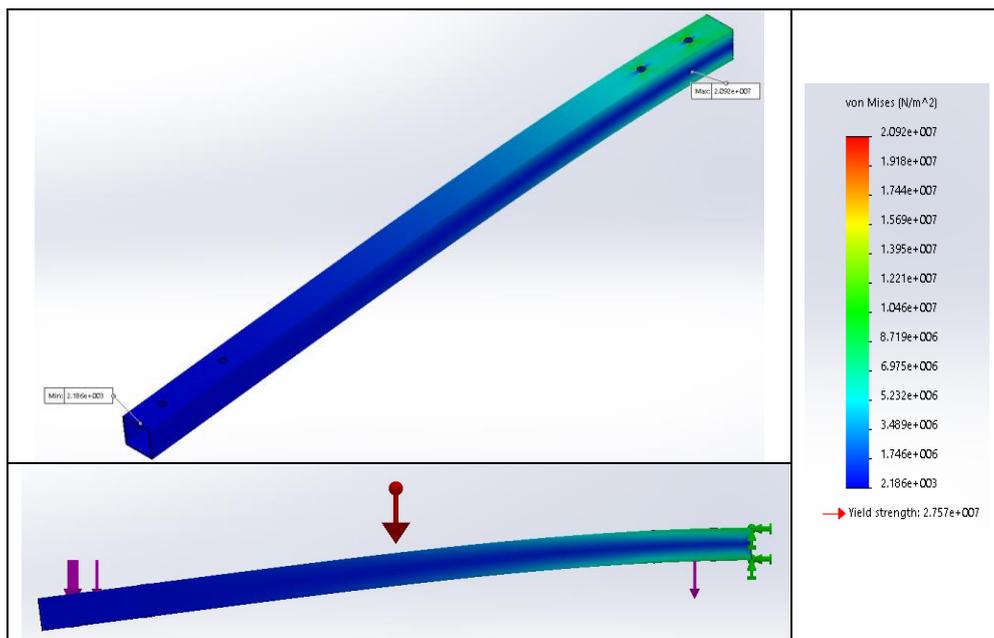


Figura 43. Esfuerzos de Von Mises para los brazos [AUTOR]

En la figura 43 se puede observar uno de los brazos de soporte el cual está hecho de aluminio. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor $2.092e+007$. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es $2.757e+007$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que este brazo de

soporte puede soportar hasta 1.3 veces la carga puesta sobre ella, con lo cual se concluye que tanto el brazo como el material cumplen su función.

SUMATORIA DE FUERZAS EN DIRECCIÓN NORMAL

$$4F_{3N} - 4F_{2N} = ma_N$$

$$4F_{3N} = ma_N + 4F_{2N}$$

$$4F_{3N} = \frac{ma_N + 4F_{2N}}{4}$$

SUMATORIA DE FUERZAS EN DIRECCIÓN TANGENCIAL

$$4F_{3T} - 4F_{2T} = ma_T$$

$$4F_{3T} = \frac{ma_T + 4F_{2T}}{4}$$

8.3.3. FATIGA

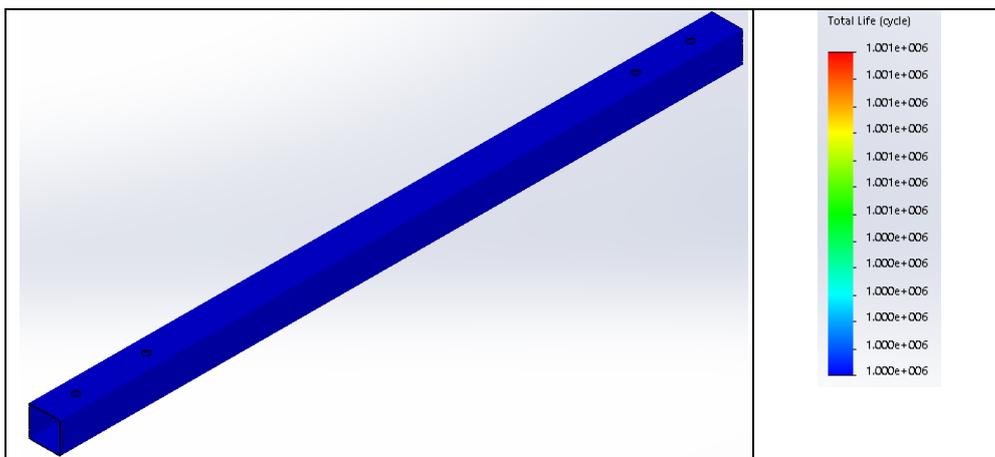


Figura 44. Ciclo de vida [AUTOR]

Nuevamente utilizando los esfuerzos máximos calculados en el análisis estático, se realiza el estudio por fatiga y se calcula la vida del elemento. Se utiliza la gráfica S-N para aluminio alloy 1060. Dicha gráfica viene en escala logarítmica y se encuentra por defecto en SolidWorks. Al ser tan baja la carga que soporta los resultados muestran que puede llegar a $1.00 e^6$ ciclos.

8.4. ESTRELLA



Figura 45. Mallado estrella [AUTOR]

8.4.1. DETALLES DE LA MALLA

Mesh Details	
Study name	Static 1 (Predeterminado)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	2 mm
Tolerance	0.1 mm
Mesh quality	High
Total nodes	1016548
Total elements	688275
Maximum Aspect Ratio	6.4541
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99.9
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(h:m:ss)	00:01:33
Computer name	G75VW-AJGC

Figura 46. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.4.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

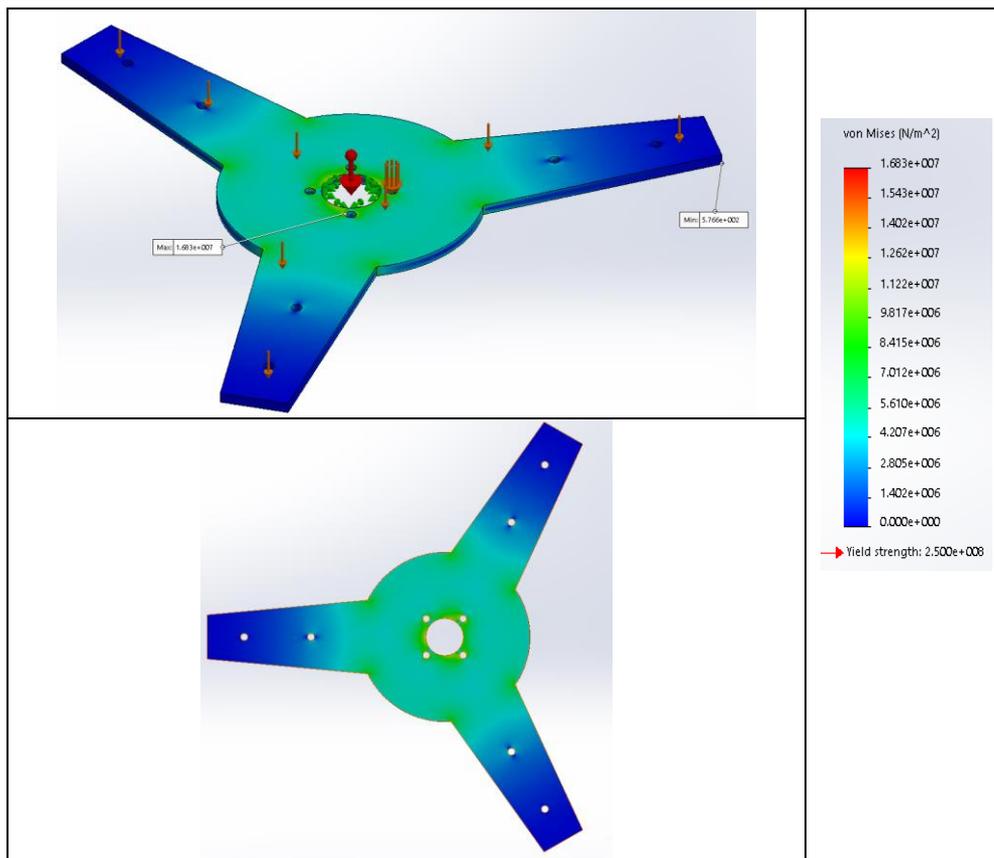


Figura 47. Esfuerzos de Von Mises para la estrella [AUTOR]

En la figura 47 se puede observar la estrella de soporte la cual está hecha de Acero al carbón. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor $1.683e+007$. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es $2500e+008$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que esta estrella puede soportar hasta 15 veces la carga puesta sobre ella, con lo cual se concluye que tanto la estrella como el material cumplen su función.

SUMATORIA DE FUERZAS EN DIRECCIÓN NORMAL

$$\sum F_y = m * a_n$$

$$-F_{y2} + F_{y3} = m * a_n$$

SUMATORIA DE FUERZAS EN DIRECCIÓN TANGENCIAL

$$\sum F_x = m * a_t$$

$$-F_{x2} + F_{x3} = m * a_t$$

$$F_{z3} = F_{z21} + F_{z22}$$

RESOLVIENDO EL SISTEMA DE ECUACIONES Y REMPLAZANDO TENEMOS

$$F_{x3} = 16.9684 [N]$$

$$F_{y3} = 5899.69 [N]$$

$$F_{z3} = 23.367 [N]$$

8.4.3. FATIGA

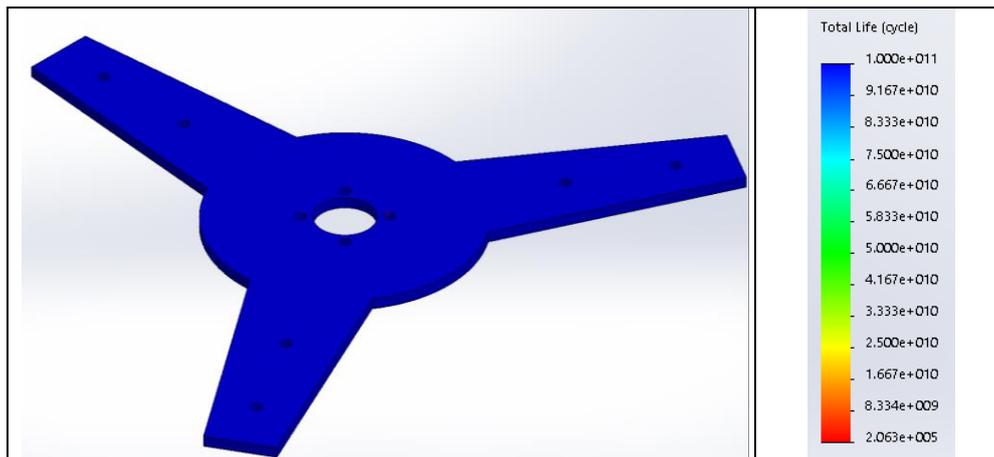


Figura 48. Ciclo de vida [AUTOR]

Realizando el análisis por fatiga para la estrella de acero, y aplicando una tensión base cero, donde se tiene la tensión máxima y la tensión mínima es nula por lo que el valor absoluto de la tensión media y el valor absoluto de la tensión alterna son iguales. Tenemos que la vida del elemento puede llegar hasta los **1.000 e11** ciclos según la carga aplicada en el análisis estático.

8.5. EJE



Figura 49. Mallado eje [AUTOR]

8.5.1. DETALLES DE LA MALLA

Mesh Details	
Study name	Static 1 (Predeterminado)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	On
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	2 mm
Tolerance	0.1 mm
Mesh quality	High
Total nodes	341095
Total elements	239644
Maximum Aspect Ratio	4.0349
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	100
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:08
Computer name	G75Vw-AJGC

Figura 50. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.5.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

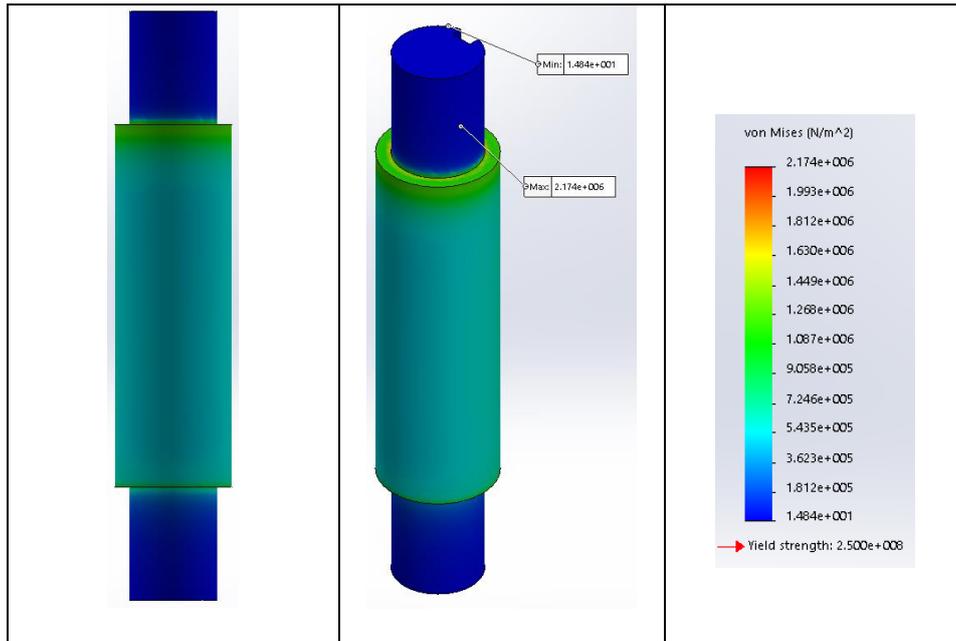


Figura 511. Esfuerzos de Von Mises para el eje [AUTOR]

En la figura 51 se puede observar el eje el cual está hecho de Acero, se le aplicó la carga correspondiente al peso de los componentes suspendidos como lo son los brazos, estrellas, estator, brazos y alabes. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor $2.174e+006$. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es $2.500e+008$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que este eje puede soportar hasta 115 veces la carga puesta sobre ella, con lo cual se concluye que tanto el eje como el material cumplen su función.

8.5.3. FATIGA

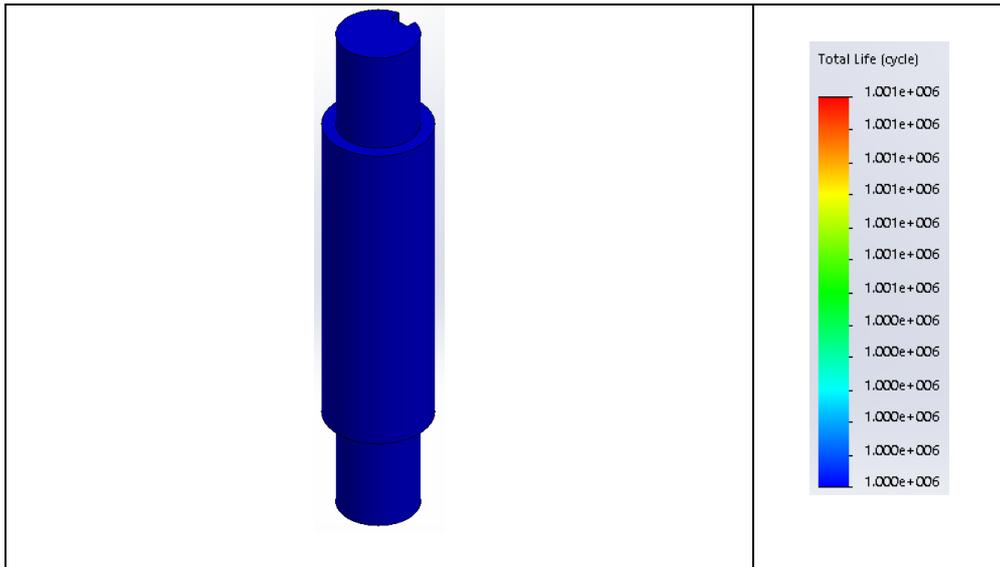


Figura 52. Ciclo de vida [AUTOR]

8.6. ÁLABE

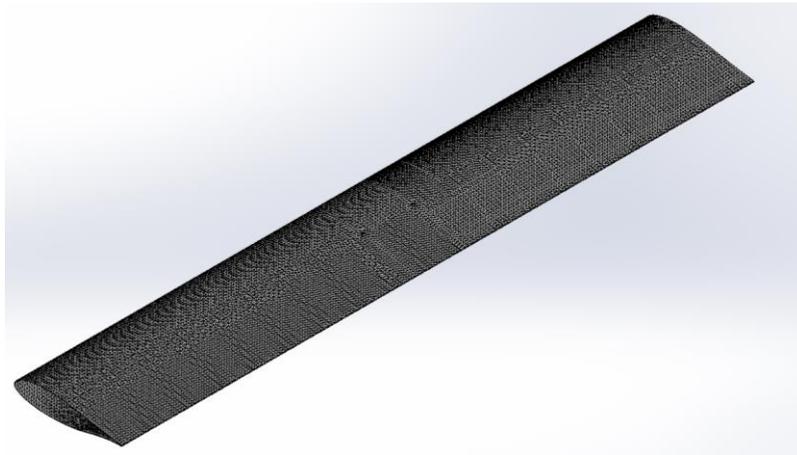


Figura 53. Mallado alabe [AUTOR]

8.6.1. CARACTERISTICAS DE LA MALLA

Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Predeterminado-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesh Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	6 mm
Tolerance	0.3 mm
Mesh quality	High
Total nodes	417029
Total elements	243357
Maximum Aspect Ratio	92.363
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	0.261
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	45.5
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:03:36
Computer name	G75VW-AJGC

Figura 54. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.6.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

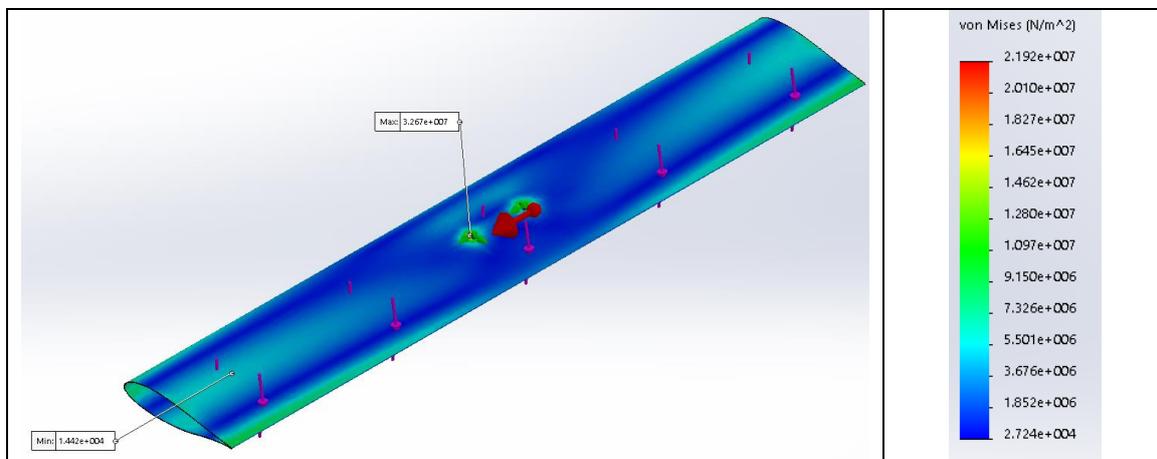


Figura 55. Esfuerzos de Von Mises para el álabe [AUTOR]

En la figura 55 se puede observar uno de los alabes el cual está hecho de fibra de carbono, se le aplicó la carga correspondiente. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises, el mayor de estos tiene como valor $2.192e+007$. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es $2.625e+008$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que este alabe puede soportar hasta 12 veces la carga puesta sobre ella, con lo cual se concluye que tanto el alabe como el material cumplen su función.

SUMATORIA DE FUERZAS

$$\sum F_x = m * a_t$$

$$F_{x1} - F_L = m * a_t$$

$$F_{x1} = m * a_t + F_L$$

$$\begin{aligned} \sum F_{y1} &= m * a_n \\ F_D - F_{y1} &= m * a_n \\ F_{y1} &= F_D - m * a_n \\ \sum F_z &= 0 \\ F_{z1} &= W \\ F_{z1} &= m * g \end{aligned}$$

SUMATORIA DE MOMENTOS

$$\begin{aligned} \sum M_x &= 0 \\ \sum M_{x1} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_y &= 0 \\ \sum M_{y1} &= 0 \end{aligned}$$

$$\sum M_z = I * \alpha$$

$$\begin{aligned} -M_A + M_{z1} &= -I_{33} * \alpha \\ M_{z1} &= -I_{33} * \alpha + M_A \end{aligned}$$

RESOLVIENDO EL SISTEMA DE ECUACIONES Y REMPLAZANDO TENEMOS

$$F_{x1} = 8.457 [N]$$

$$F_{y1} = -2878.385 [N]$$

$$F_{z1} = 23.367 [N]$$

$$M_{z1} = 2.331 [N * m]$$

8.6.3. FATIGA

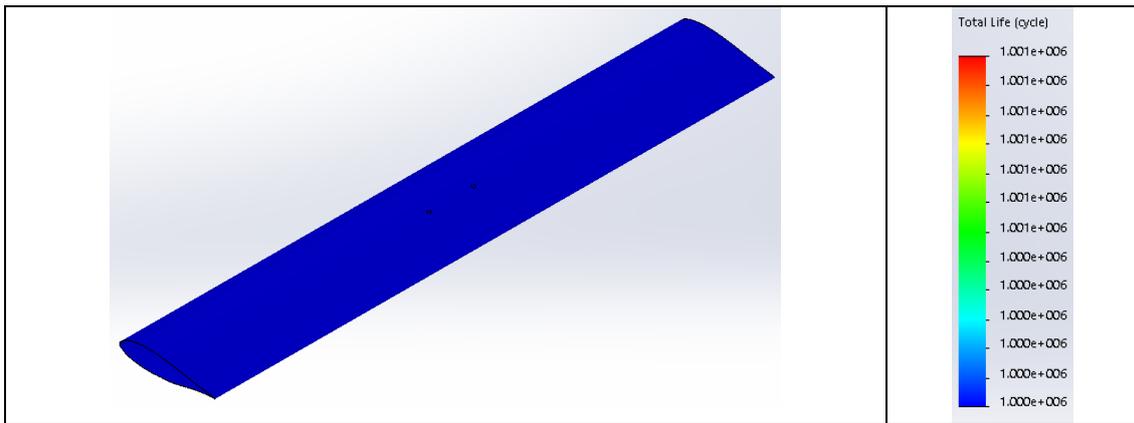


Figura 56. Ciclo de vida [AUTOR]

Utilizando los esfuerzos máximos calculados en el análisis estático previo, se realiza el estudio por fatiga y se calcula la vida del elemento. Se utiliza la curva S-N para la fibra de carbono. Dicha gráfica viene en escala logarítmica y se encuentra por defecto en SolidWorks. Y tenemos que la vida del elemento alcanza $1.00 e^6$ de ciclos.

8.7. ÁNGULO DE SOPORTE



Figura 57. Mallado ángulo de soporte [AUTOR]

8.7.1. DETALLES DEL MALLADO

Mesh Details	
Study name	Static 1 (Predeterminado)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	On
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	2 mm
Tolerance	0.1 mm
Mesh quality	High
Total nodes	139008
Total elements	87700
Maximum Aspect Ratio	3.7417
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	100
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:06
Computer name	G79\W-AJGC

Figura 58. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.7.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

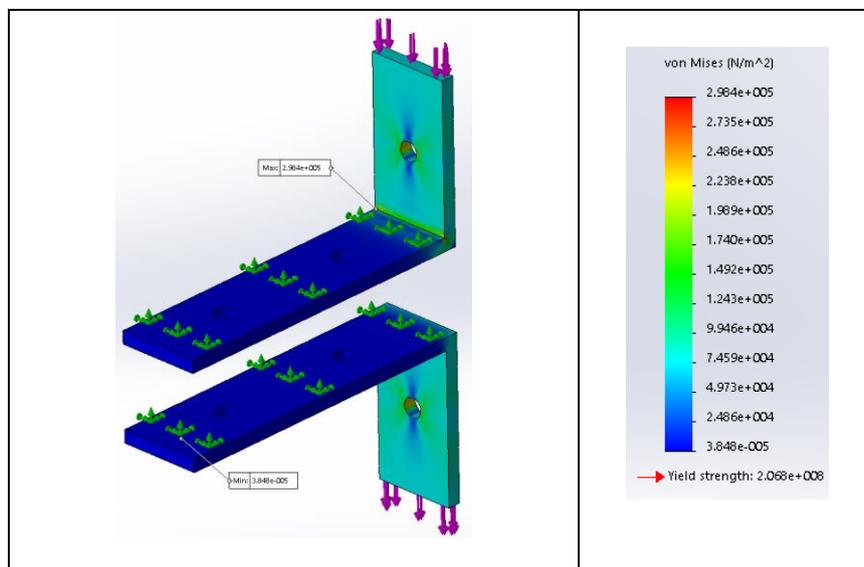


Figura 59. Esfuerzos de Von Mises para el ángulo de soporte [AUTOR]

En la figura 59 se puede observar los ángulos de soporte los cuales están hechos de acero, se le aplicó la carga correspondiente al peso de los alabes, alrededor de 2 Kg. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor $2.984e+005$. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es $2068e+008$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que estos ángulos de soporte pueden soportar hasta 693 veces la carga puesta sobre ellos, con lo cual se concluye que tanto los ángulos de soporte como el material cumplen su función.

8.7.3. FATIGA

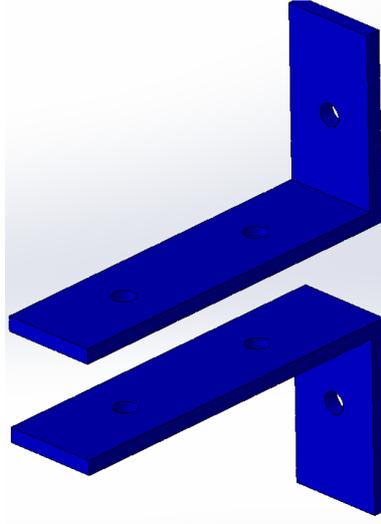


Figura 60. Ciclo de vida [AUTOR]

8.8. CUÑA

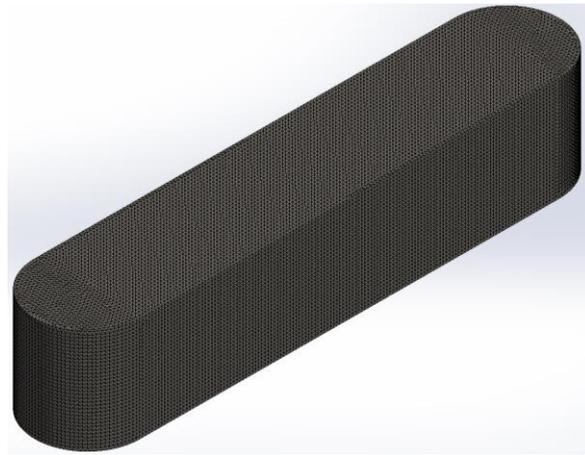


Figura 61. Mallado cuña [AUTOR]

8.8.1. DETALLES DEL MALLADO

Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Default)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	0.3 mm
Tolerance	0.015 mm
Mesh quality	High
Total nodes	965930
Total elements	690993
Maximum Aspect Ratio	5.6812
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	100
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:24
Computer name	G75VW-AJGC

Figura 62. Detalles malla independiente [AUTOR]

8.8.2. ANÁLISIS ESTÁTICO

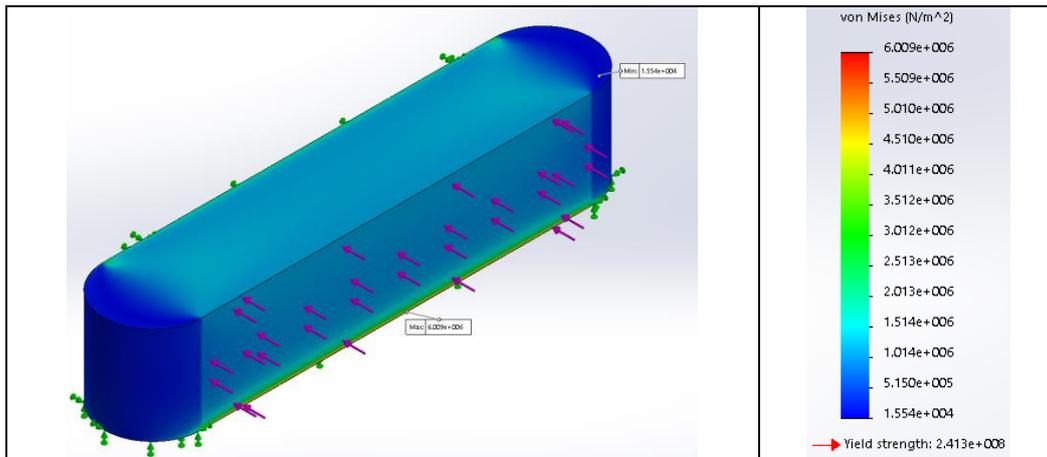


Figura 63. Esfuerzos de Von Mises para la cuña [AUTOR]

En la figura 63 se puede observar la cuña la cual está hecha de aleación de acero. Se puede ver que al calcular los esfuerzos de Von Mises el mayor de estos tiene como valor $6.009e+006$. Teniendo en cuenta que el esfuerzo al cual el material cede que es $2.413e+008$ y al hallar el factor de seguridad se encuentra que esta cuña puede soportar hasta 41 veces la carga puesta sobre ella, con lo cual se concluye que tanto la cuña como el material cumple su función.

8.8.3. FATIGA

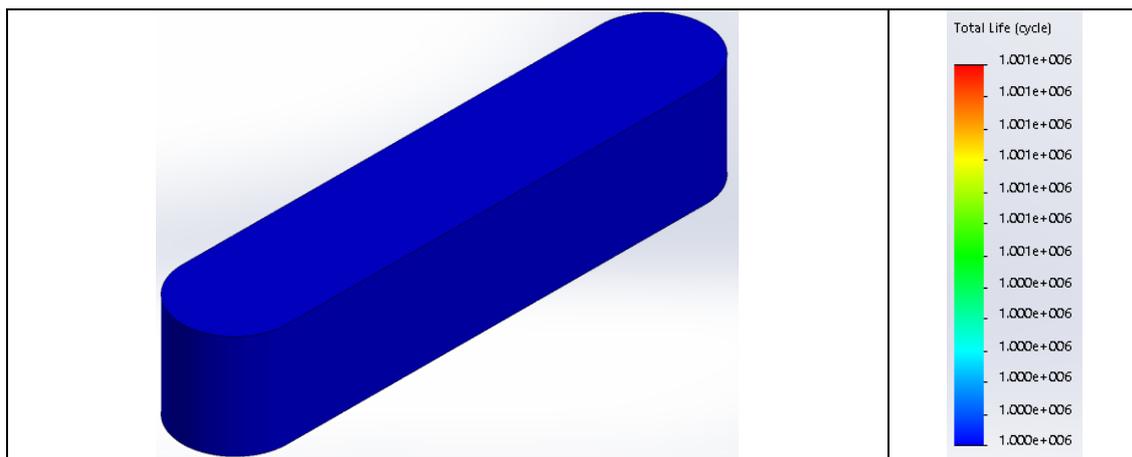


Figura 64. Ciclo de vida [AUTOR]

8.9. CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD

Se calcula el factor de seguridad para cada caso el cual viene dado por la siguiente ecuación:

$$\text{factor de seguridad} = \frac{\text{Limite elástico del material}}{\text{Esfuerzo máximo de Von Mises}} \quad [\text{Ecuación 8.11.1.1}]$$

PIEZA	FACTOR DE SEGURIDAD
TRIPODE	$\frac{2.500x10^8}{1.079x10^7} = 23$
BRIDA	$\frac{2.757x10^7}{2.092x10^7} = 1.3$
BRAZO	$\frac{2.500x10^8}{1.355x10^8} = 1.8$
ESTRELLA	$\frac{2.500x10^8}{1.683x10^7} = 15$
EJE	$\frac{2.500x10^8}{2.174x10^6} = 115$
ALABE	$\frac{2.625x10^8}{2.984x10^5} = 693$
ANGULO DE SOPORTE	$\frac{2.068x10^8}{2.192x10^7} = 693$
CUÑA	$\frac{2.413x10^8}{6.009x10^6} = 40$

TABLA 8.11.1 Factores de seguridad

9. INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

9.1. DIMENSIONES DEL DOMINIO DE SIMULACIÓN

El dominio de simulación de una parte importante del análisis por elementos finitos o modelado numérico. No debe ser muy pequeño para poder reproducir de una manera correcta el flujo deseado. Ni muy grande para no incurrir en gasto innecesario de tiempo y máquina a la hora de realizar los análisis.

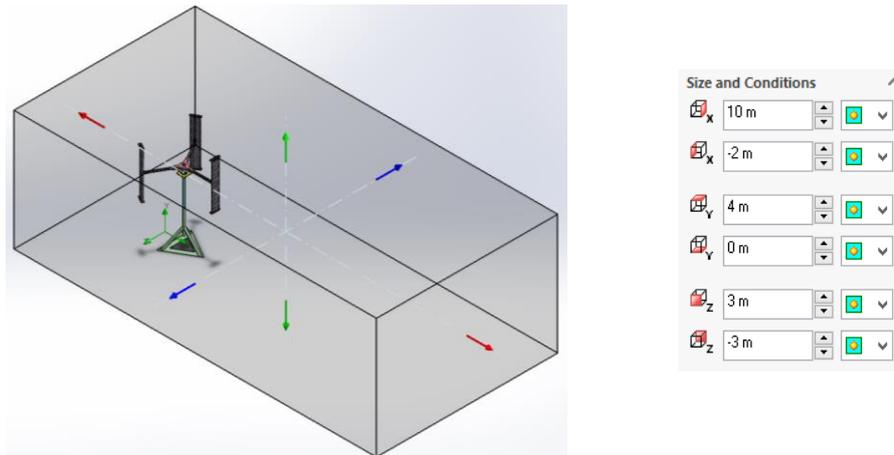


Figura 65. Dominio de simulación [AUTOR]

9.2. ANÁLISIS DINÁMICO

Para el análisis dinámico se realiza un mallado global al aerogenerador. Como parámetros de entrada velocidad de 10 [m/s] en la dirección X, La dirección de entrada del viento es indiferente en simulación ya que el aerogenerador gira respecto a un eje y los alabes esta situados simétricamente. Se selecciona el eje del aerogenerador y se calcula sobre este el torque que se genera durante la simulación para posteriormente calcular la potencia mecánica.

9.2.1. VISTA FRONTAL

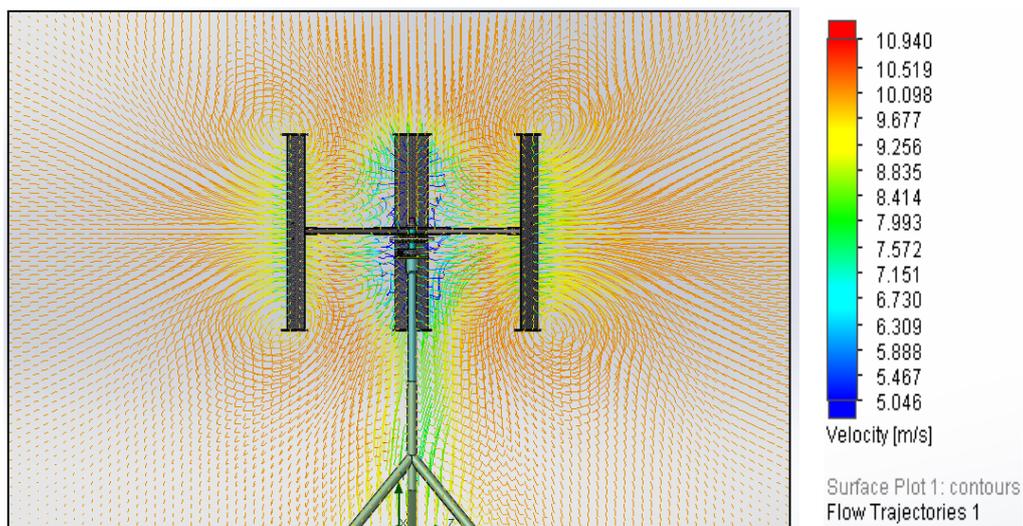


Figura 66. Flujo de viento a través del aerogenerador [AUTOR]

9.2.2. RESULTADOS A 30 GRADOS

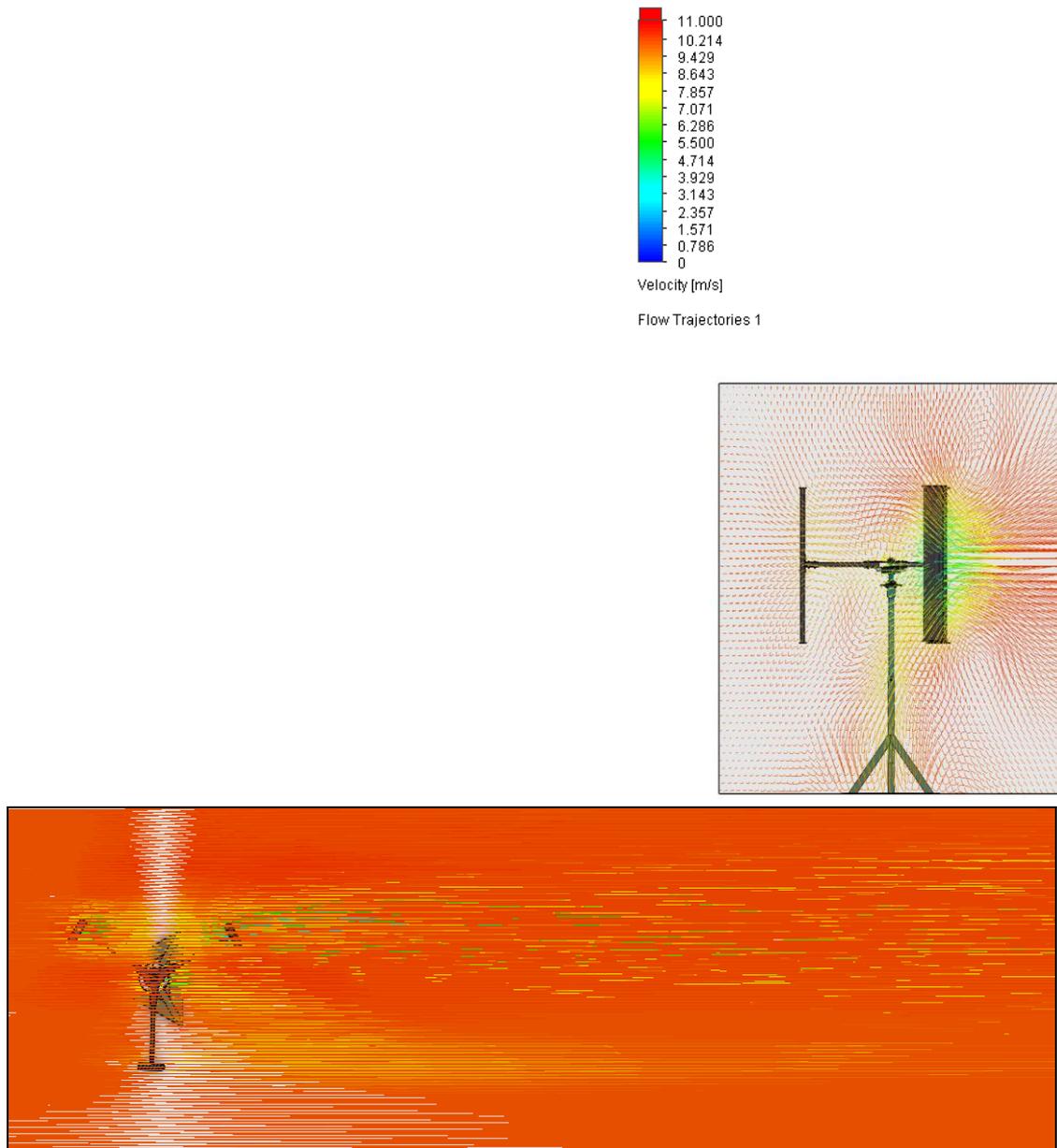


Figura 67. Trayectoria del viento a 30 grados ^[AUTOR]

Se observa la trayectoria del fluido a través del aerogenerador para esta posición evidenciando una disminución de la velocidad del flujo para los alabes de la parte superior a más o menos la mitad del viento de entrada.

9.2.3. POTENCIA INSTANTÁNEA A 30 GRADOS

List of Goals				
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Av Velocity (X) 1	9.66488 m/s	Achieved (IT = 92)	0.0447612 m/s	9.66392 m/s
GG Av Velocity (Y) 1	0.00486076 m/s	Achieved (IT = 116)	0.000960399 m/s	0.0051721 m/s
GG Av Velocity 1	9.67201 m/s	Achieved (IT = 92)	0.0440492 m/s	9.671 m/s
GG Force (X) 1	50.1565 N	Achieved (IT = 92)	20.1269 N	50.4661 N
GG Force (Y) 1	0.0515255 N	Achieved (IT = 92)	0.629546 N	0.168968 N
GG Force (Z) 1	12.4407 N	Achieved (IT = 92)	5.19828 N	12.2656 N
GG Force 1	51.6763 N	Achieved (IT = 92)	20.0342 N	51.9362 N
GG Normal Force (X) 1	50.01 N	Achieved (IT = 92)	20.1178 N	50.3168 N
GG Normal Force (Y) 1	0.0796578 N	Achieved (IT = 92)	0.629834 N	0.18848 N
GG Normal Force (Z) 1	12.4427 N	Achieved (IT = 92)	5.19898 N	12.2673 N
GG Normal Force 1	51.5347 N	Achieved (IT = 92)	20.0242 N	51.7917 N
GG Torque (X) 1	28.9114 N*m	Achieved (IT = 92)	9.5584 N*m	30.9076 N*m
GG Torque (Y) 1	938.455 N*m	Achieved (IT = 92)	382.894 N*m	944.413 N*m
GG Torque (Z) 1	-102.011 N*m	Achieved (IT = 92)	45.069 N*m	-102.531 N*m

Figura 68. Resultados simulación [AUTOR]

Tomando el torque generado para el eje Y, y la velocidad promedio de la simulación calculamos la potencia mecánica.

$$V = 9.66488 \text{ [m/s]} \rightarrow V = 1.012 \text{ [rad/s]}$$

$$Tm = V * \text{Torque}(y)$$

$$Tm = 1.012 * 944.413$$

$$Tm = 955.844 \text{ [W]}$$

Para la posición mostrada se cumple con la condición de diseño la cual es generar mas de 300 [W] de potencia en el eje

9.2.4. RESULTADOS A 90 GRADOS

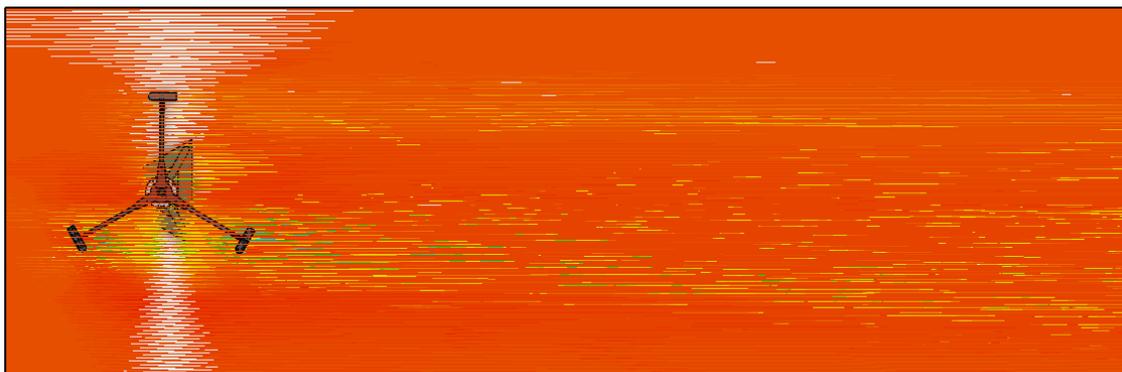
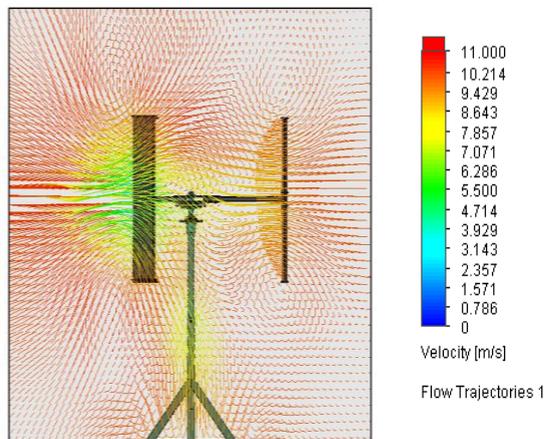


Figura 69. Trayectoria del viento a 90 grados [AUTOR]

9.2.5. POTENCIA INSTANTÁNEA A 90 GRADOS

List of Goals				
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Av Velocity (X) 1	9.67888 m/s	Achieved (IT = 98)	0.0409754 m	9.68746 m/s
GG Av Velocity (Y) 1	0.0166015 m/s	Achieved (IT = 94)	0.0024959 m	0.0173294 m/s
GG Av Velocity 1	9.6855 m/s	Achieved (IT = 98)	0.040339 m/	9.69423 m/s
GG Force (X) 1	50.9506 N	Achieved (IT = 94)	18.8148 N	51.0452 N
GG Force (Y) 1	-0.528837 N	Achieved (IT = 94)	0.410818 N	-0.461094 N
GG Force (Z) 1	-22.1187 N	Achieved (IT = 94)	6.97292 N	-22.1007 N
GG Force 1	55.5471 N	Achieved (IT = 94)	19.5628 N	55.6263 N
GG Normal Force (X) 1	50.7732 N	Achieved (IT = 94)	18.8061 N	50.8633 N
GG Normal Force (Y) 1	-0.533544 N	Achieved (IT = 94)	0.410726 N	-0.466312 N
GG Normal Force (Z) 1	-22.121 N	Achieved (IT = 94)	6.97247 N	-22.1015 N
GG Normal Force 1	55.3854 N	Achieved (IT = 94)	19.5639 N	55.4598 N
GG Torque (X) 1	-60.1347 N*m	Achieved (IT = 94)	13.2434 N*m	-59.0646 N*m
GG Torque (Y) 1	982.557 N*m	Achieved (IT = 94)	359.542 N*m	984.497 N*m
GG Torque (Z) 1	-99.6051 N*m	Achieved (IT = 94)	41.0669 N*m	-99.8738 N*m

Figura 70. Resultados simulación [AUTOR]

Se calcula la potencia mecánica para esta nueva posición

$$V = 9.68746 \text{ [m/s]} \rightarrow V = 1.0144 \text{ [rad/s]}$$

$$Tm = V * Torque(y)$$

$$Tm = 1.0144 * 984.497$$

$$Tm = 998.741 \text{ [W]}$$

9.2.6. RESULTADOS A 120 GRADOS

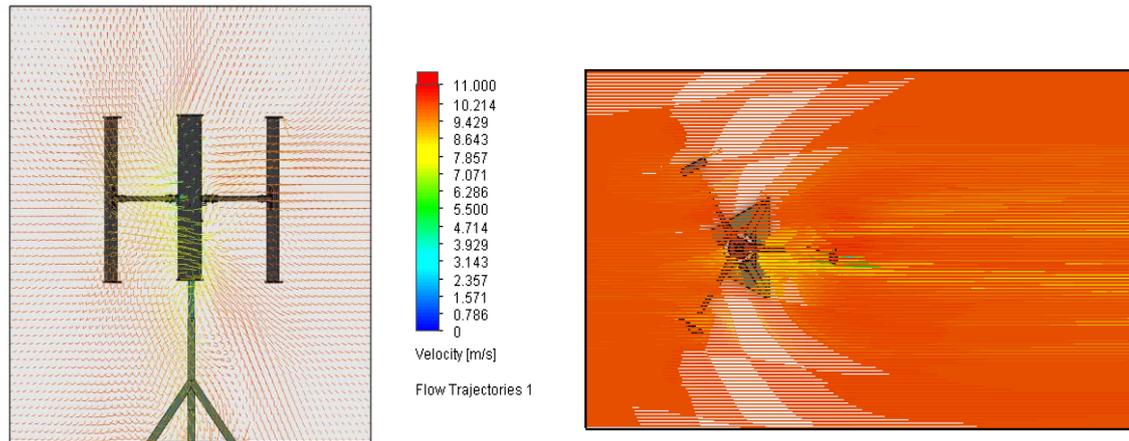


Figura 71. Trayectoria del viento a 120 grados [AUTOR]

9.2.7. POTENCIA INSTANTÁNEA A 120 GRADOS

List of Goals				
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Av Velocity (X) 1	9.74562 m/s	Achieved (IT = 85)	0.037596 m/s	9.74576 m/s
GG Av Velocity (Y) 1	-0.00336093 m/s	Achieved (IT = 130)	0.000887808 m/s	-0.00324702 m/s
GG Av Velocity 1	9.74846 m/s	Achieved (IT = 85)	0.037228 m/s	9.74858 m/s
GG Force (X) 1	17.3255 N	Achieved (IT = 80)	7.75205 N	17.7016 N
GG Force (Y) 1	1.8148 N	Achieved (IT = 80)	1.07698 N	1.7462 N
GG Force (Z) 1	2.04739 N	Achieved (IT = 80)	1.25133 N	2.31049 N
GG Force 1	17.5402 N	Achieved (IT = 80)	7.73858 N	17.9401 N
GG Normal Force (X) 1	17.2109 N	Achieved (IT = 80)	7.7432 N	17.5879 N
GG Normal Force (Y) 1	1.82558 N	Achieved (IT = 80)	1.07525 N	1.75599 N
GG Normal Force (Z) 1	2.05042 N	Achieved (IT = 80)	1.25134 N	2.30803 N
GG Normal Force 1	17.4285 N	Achieved (IT = 80)	7.72923 N	17.8285 N
GG Torque (X) 1	41.7302 N*m	Achieved (IT = 80)	19.8496 N*m	41.0664 N*m
GG Torque (Y) 1	329.586 N*m	Achieved (IT = 80)	148.855 N*m	336.647 N*m
GG Torque (Z) 1	-38.2991 N*m	Achieved (IT = 80)	15.8986 N*m	-38.954 N*m

Figura 72. Resultados simulación [AUTOR]

Se calcula la potencia mecánica para esta nueva posición

$$V = 9.74576 \text{ [m/s]} \rightarrow V = 1.020 \text{ [rad/s]}$$

$$Tm = V * Torque(y)$$

$$Tm = 1.020 * 336.647$$

$$Tm = 343.57 \text{ [W]}$$

Para los casos teóricos de simulación planteados se cumple con la premisa de generar 300 [W] de potencia mecánica en el eje.

Teniendo como base esta información de las simulaciones se procede a realizar las pruebas de campo y verificar que el sistema se mueve, cumple con su condición de auto arranque y alcanza velocidades que le permitan cumplir con la ya mencionada principal condición de diseño.

10. PROTOCOLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Como primera medida se debe contar con los instrumentos y herramientas necesarias para el correcto desarrollo de las pruebas. Anemómetro para medir la velocidad el viento, encoder para medir la velocidad del aerogenerador, fototacómetro para validar la velocidad sensada por el encoder, multímetro para medir el voltaje generado, llave Hexagonal de 4mm para realizar el cambio si se requiere de la correa de caucho, 2 llaves de 9/16'' para manipular la tornillería de todo el aerogenerador, polea plástica de 2'' para el acople entre encoder y eje, correa de caucho de 15cm para la transmisión del movimiento.

Se debe colocar la polea en el eje del encoder y situarlo de forma centrada con el eje, añadir la correa de caucho, el encoder tiene 4 cables que son de color blanco, negro, rojo, verde. Los cables de color rojo y negro son alimentación de 5V y tierra respectivamente, no se requiere una fuente externa de alimentación ya que el Arduino soporta tanto la alimentación del encoder como la corriente a suministrar al mismo. Los cables verde y blanco corresponden a la señal la cual va a los pines digitales 3 y 4 de Arduino. Se carga el programa de Arduino y abriendo el puerto serial se verifica que las variables de tiempo y velocidad se estén imprimiendo.

En el anemómetro y en el iPad® en este caso, se debe activar la conexión Bluetooth® y realizar el correspondiente emparejamiento entre ambos dispositivos. Después de realizado, el anemómetro se sujeta 20cm abajo del nivel inferior de los alabes sobre el tubo vertical de soporte, con el fin de que el aire impacte de manera directa sobre el dispositivo y su medición corresponda a la realidad sin tener interferencia alguna de por medio.

Las pruebas fueron realizadas en el departamento de Santander, municipio de Los Santos, vereda La Esperanza, según la experiencia de los habitantes del sector y lo que se pudo observar los vientos aprovechables, de mayor intensidad se dan de 11:00 am a

3:00 pm. Los vientos mínimos para romper la inercia del aerogenerador y poder ver el auto arranque estuvieron oscilando entre 9:00 am a 11:00 am y 4:00 pm a 6:00 pm, lo que se denominó vientos menos intensos. Por lo que se recomienda usar dicha información para el trabajo futuro a realizar.

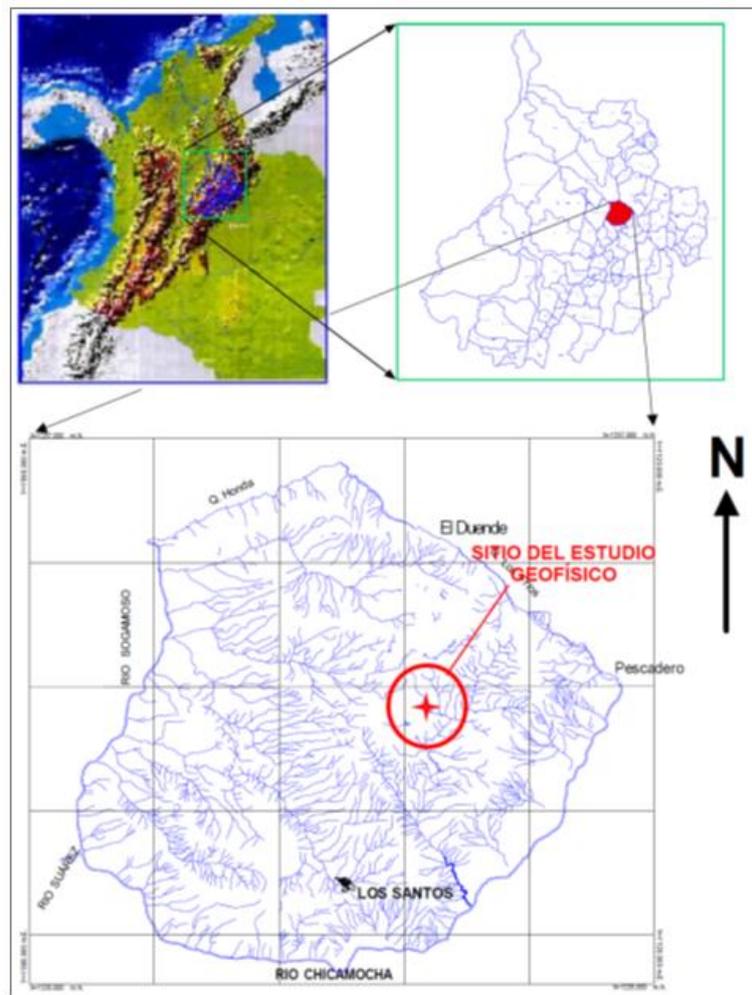


Figura 73. Ubicación geográfica Los Santos ^[42]



Figura 74. Ubicación geográfica sitio de pruebas ^[42]

11. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Inicialmente se realizaron pruebas sobre la camioneta como se puede observar en las imágenes siguientes, pero se detalló que debido al peso concentrado en la parte superior de aerogenerador y la suspensión del vehículo se generaba un balanceo natural pero inadecuado ya que al ser tan mínima la separación entre rotor y estator dichos componentes se golpeaban, lo cual frenaba el sistema y ocasionaba desgaste de algunos de los componentes.

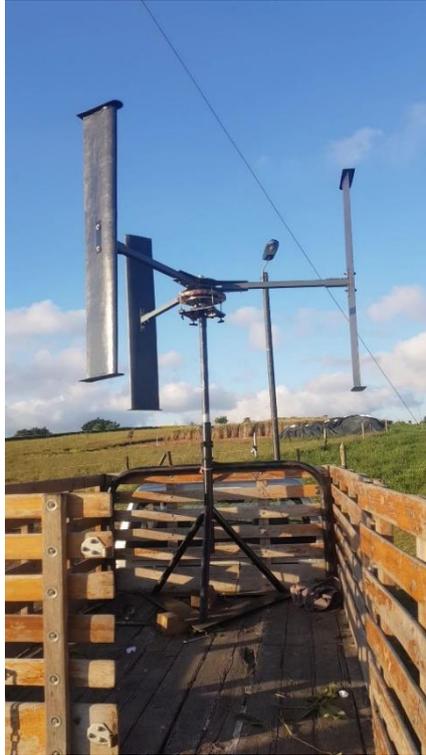


Figura 75. Montaje en camioneta 1 [AUTOR]



Figura 76. Montaje en camioneta 2 [AUTOR]

Dadas las razones anteriores se decidió izar el aerogenerador en un tubo de hierro de 6 metros, con el fin de evitar dichos inconvenientes y mejorar la recepción del viento.



Figura 77. Montaje en base cimentada ^[AUTOR]

Antes de comenzar con la toma de datos, se realizó la programación en Arduino de un código en C++ que permitiera obtener velocidad de la información que provea el encoder. [Ver Anexo C]. El encoder seleccionado trabaja detectando el movimiento de rotación de un eje y entregando como salida de dicho transductor una cantidad de pulsos por vuelta, la cual mediante una ecuación diseñada se puede convertir en velocidad.

La calibración del encoder óptico LPD3806 se realizó en un ambiente controlado mediante el uso del fototacómetro digital UNI -T372 y un motorreductor de 12 Kg a 12 v. Para dicho procedimiento se llevó a cabo la construcción de un sistema de transmisión de movimiento entre el motorreductor y el encoder, el cual consistía en unir ambos dispositivos mediante una banda elástica y 2 poleas plásticas del mismo diámetro con el fin de que el encoder girara a la misma razón que el motorreductor. La polea del encoder tuvo que ser cubierta con una pintura antirrefletores y se le añadió un sección de cinta delgada del largo del radio de la polea (1 pulgada) con el fin que el haz

infrarrojo con el cual el fototacómetro lee la velocidad se viese reflejado y así pudiese realizarse dicho conteo. El motorreductor estaba alimentado con una fuente reguladora de voltaje DC para variar el voltaje y por consiguiente la velocidad del moto reductor para poder verificar si la velocidad sensada por el encoder y el fototacómetro coincidían.

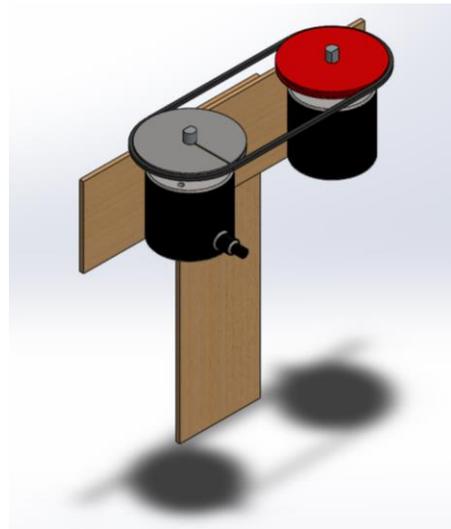


Figura 78. Montaje calibración [AUTOR]

A continuación, se muestran los datos tomados para diferentes voltajes de funcionamiento del motorreductor con sus respectivas lecturas de velocidad tanto para el encoder como para el fototacómetro.

VOLTAJE (V)	VELOCIDAD FOTOTACÓMETRO (RPM)	VELOCIDAD ENCODER (RPM)	PROMEDIO (RPM)	% ERROR
3	95	92	93.67	1.40
		93		
		96		
6	190	185	186	2.10
		182		
		191		
9	270	270	268.67	0.49
		269		
		267		
12	389	388	388.67	0.085
		387		

Tabla 7.13.1. Datos de calibración

En esta configuración se utilizaron 2 andamios para el izado. El tubo del aerogenerador se sujetó con cinta Banda, adicional a esto se tensionó el tubo de soporte con guaya en 4 puntos distintos formando una x para mantener estático y seguro el aerogenerador frente a las corrientes de viento que pudiesen afectarlo durante su funcionamiento.

Se sensó la velocidad del viento utilizando el anemómetro UNI-T UT363 el cuál transmitía los datos de tiempo, velocidad el viento y temperatura mediante conexión Bluetooth con un iPad mini de 1ra generación de sistema operativo iOS ya que la aplicación en sistemas Android presenta fallos a la hora de exportar datos. Dichos datos se exportaban en formato .CSV y PDF a través de correo electrónico. La velocidad de giro de aerogenerador se midió utilizando el encoder óptico LPD3806, al encoder se acopló una polea plástica del mismo diámetro del eje del aerogenerador con el fin de tener una relación 1:1 con el fin de evitar conversiones que modifique o afecten los datos por un post procesamiento innecesario. El encoder estaba conectado al Arduino Mega 2560 el cuál mediante una programación previa capturaba datos de tiempo y velocidad. Otras mediciones adicionales, para el trabajo futuro, se realizaron con el multímetro de forma manual, con el fin de comprar velocidad con voltaje generado.

11.1. VELOCIDAD DEL VIENTO

Inicialmente se realizaron 3 tomas de datos seguidas alrededor del mediodía utilizando el anemómetro UNI-T UT363 por intervalos de 40, 8 y 6 minutos.

11.1.1. PRUEBA 1

Para esta toma se logró registrar una velocidad pico de 8.48 [m/s] y velocidad promedio de 5 [m/s] con 2240.5 datos.

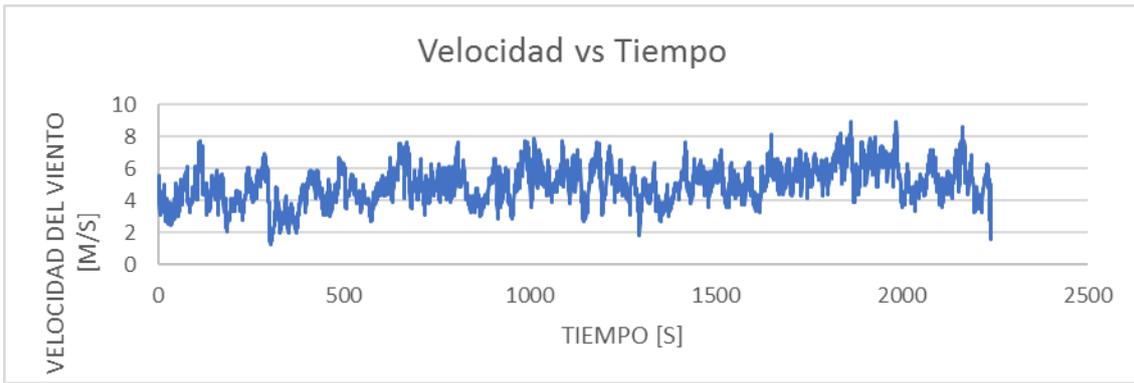


Figura 79. Gráfica de velocidad del viento toma 1 [AUTOR]

11.1.2. PRUEBA 2

Para esa segunda toma se registró una velocidad pico de 8.71 [m/s] y velocidad promedio 4.01 [m/s] con 402 datos.

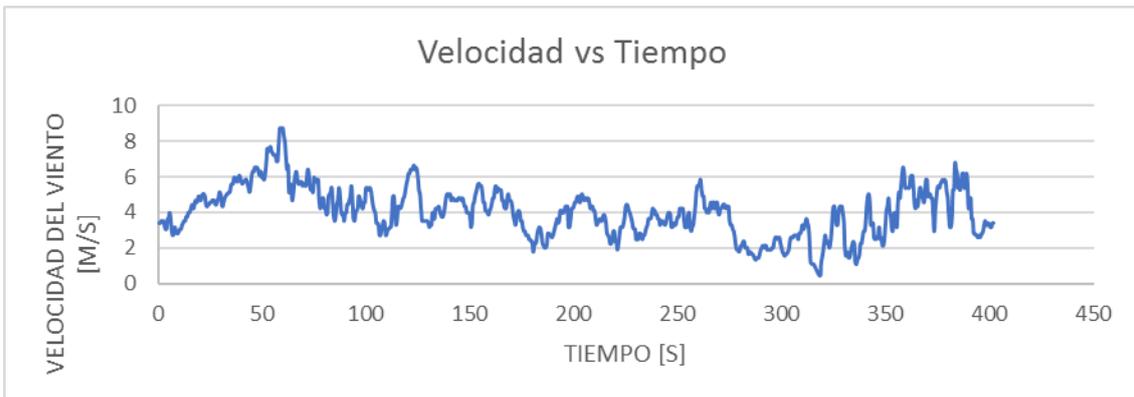


Figura 80. Gráfica de velocidad del viento toma 2 [AUTOR]

11.1.3. PRUEBA 3

Para esa tercera toma se registró una velocidad pico de 8.25 [m/s] y velocidad promedio de 4.5 [m/s] con 503.5 datos.



Figura 81. Gráfica de velocidad del viento toma 3 [AUTOR]

11.2. VELOCIDAD DEL VIENTO ESTACIÓN VANTAGE PRO 2

Luego de estas muestras se realizaron mediciones de viento por periodos más largos con la estación meteorológica marca Davis Instruments de referencia Vantage Pro 2, con el fin de tener registro del comportamiento del viento en el sitio de las pruebas de manera continua.

A continuación, se muestra la gráfica en tiempo real suministrada por el software de la estación meteorológica WeatherLink 5.9.3. La toma de datos se realizó durante poco menos de 3 días, en esta gráfica se puede visualizar en el primer recuadro la temperatura sensada por la estación y la consola de visualización.

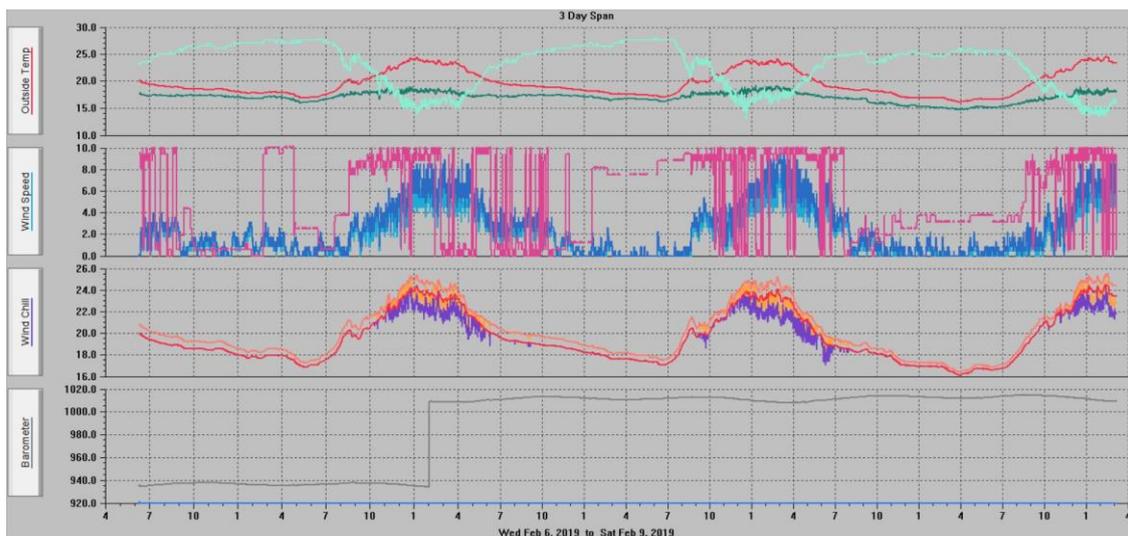


Figura 82. Gráfica de datos de velocidad del viento [AUTOR]

La gráfica anterior nos suministra gran variedad de datos entre ellos temperatura, humedad, velocidad del viento, dirección del viento, sensación térmica a causa del viento, la humedad relativa y la temperatura, lluvia y presión. El programa de escritorio mencionado no permite la visualización de manera independiente de cada una de las variables medidas, por lo que se hace necesario tomar la variable de interés que en este caso es la velocidad del viento para graficarla y analizar su comportamiento.

11.2.1. DÍA 1

En el primer día la toma de datos empezó a las 6:24 pm hasta la media noche con velocidad pico de 3.1 [m/s] justificada la baja velocidad ya que la toma abarca las horas de la noche.

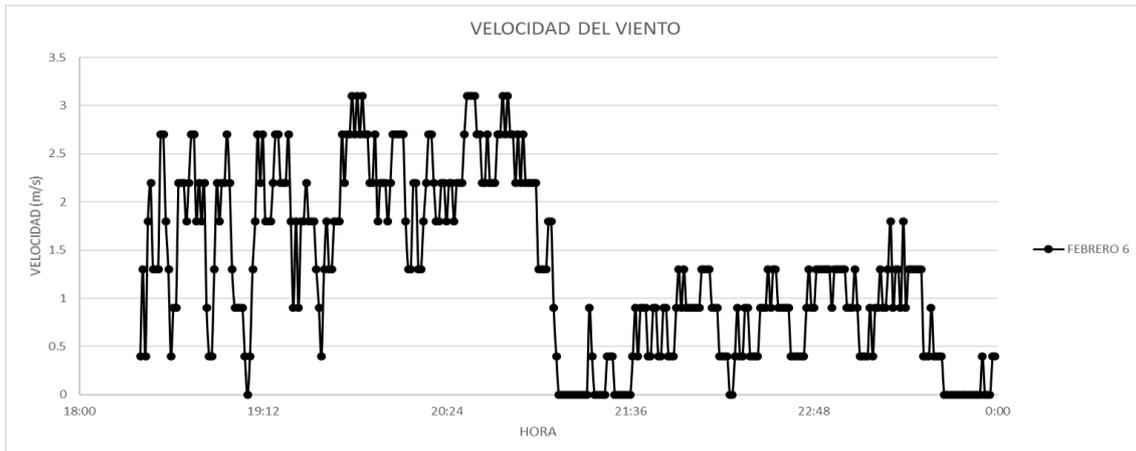


Figura 83. Velocidad del viento febrero 6 [AUTOR]

11.2.2. DÍA 2

En el segundo día la toma de datos se registró por 24 horas con velocidad pico de 7.2 [m/s] a la 01:42 pm.

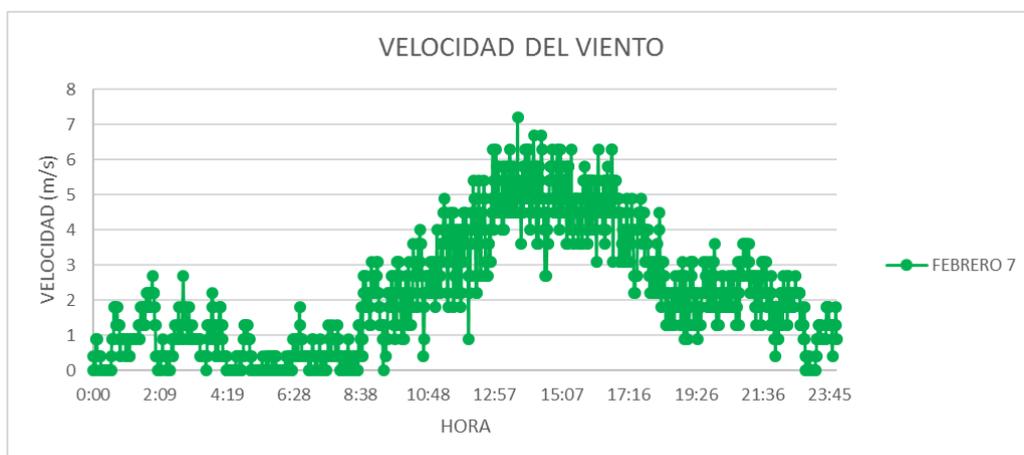


Figura 84. Velocidad del viento febrero 7 [AUTOR]

11.2.3. DÍA 3

En el tercer día la toma de datos se registró nuevamente por 24 horas con velocidad pico de 7.6 [m/s] a la 03:20 pm.

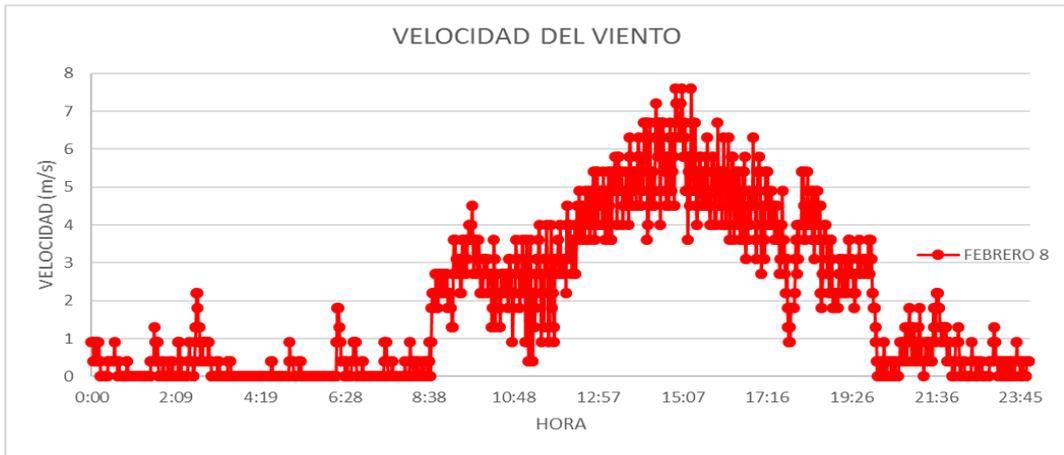


Figura 85. Velocidad del viento febrero 8 [AUTOR]

11.2.4. DÍA 4

En el cuarto día la toma de datos se registró por un poco más de 15 horas con velocidad hasta ese momento de pico de 6.7 [m/s] a la 03:20 pm.

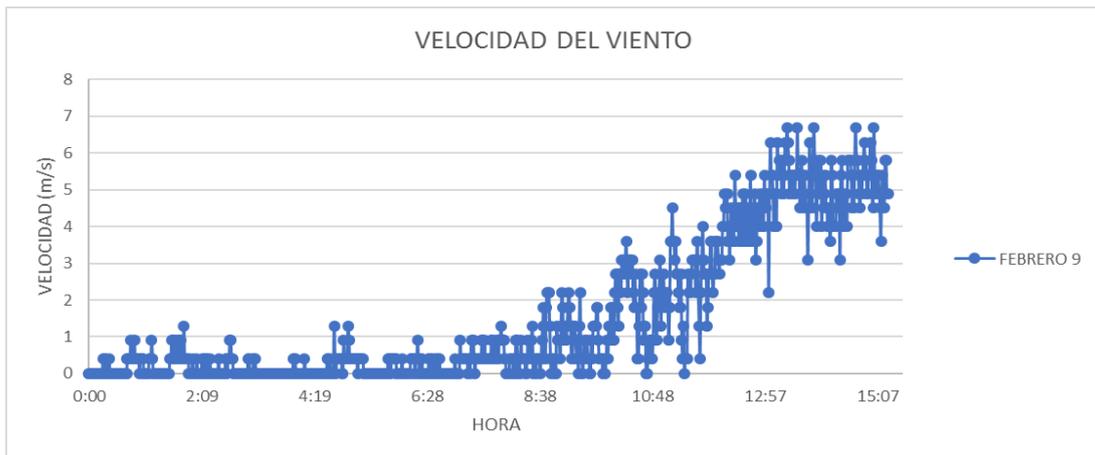


Figura 86. Velocidad del viento febrero 9 [AUTOR]

11.2.5. COMPARATIVA DÍAS DE VIENTO

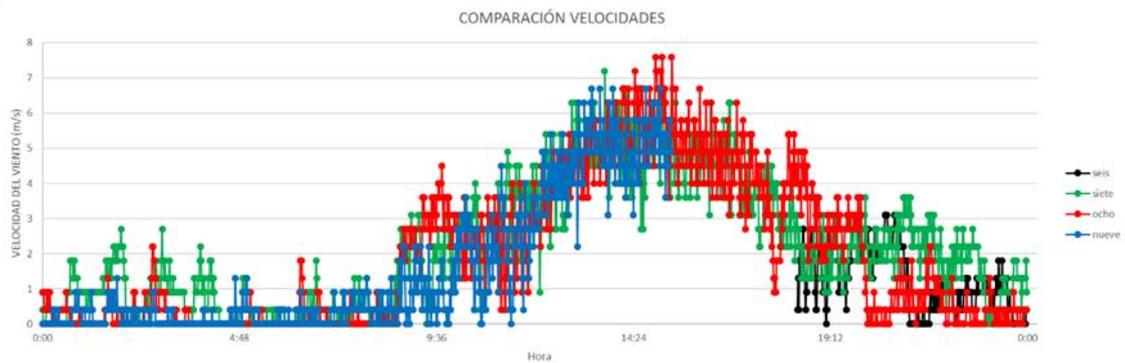


Figura 87. Comparación de velocidades del viento [AUTOR]

Se observa un patrón de comportamiento similar en la velocidad del viento en los 3 días de toma de datos. La estación Vantage Pro 2 cada 1 minuto enviaba a la consola de visualización el dato sensado el cual, en ese mismo periodo era descargado al computador a través de la aplicación de escritorio para Windows Weather Link 5.9.3 con el fin de ir almacenando dicha información. Aunque cada componente utilizado (computador portátil, estación y consola) contaba con autonomía debido a sus baterías, en la zona donde se realizaron las pruebas y las mediciones, el flujo eléctrico no era estable por consiguiente se quiso evitar de esta manera alguna pérdida de datos.

La zona de baja velocidad en el comienzo de la gráfica tiene relación con el tiempo en el cual fue tomada, alrededor de las 6 y 7 pm. Los periodos con los picos más altos de velocidad corresponden a mediciones en intervalos de tiempo entre las 11 am y 3 pm.

11.3. VELOCIDAD DEL AEROGENERADOR

Para la medición de la velocidad del aerogenerador se realizaron pruebas divididas en dos etapas. La primera con una duración no mayor a 40 minutos y la segunda por casi 3 días. Para la segunda etapa se obtuvieron alrededor de 600.000 datos con un periodo de muestreo de 0.1 segundos.

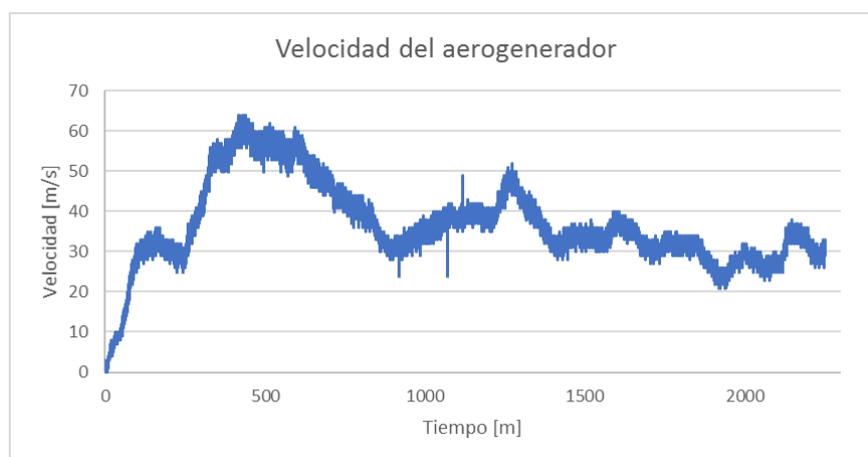


Figura 88. Gráfica de velocidad del aerogenerador etapa 1 [AUTOR]

Tenemos una velocidad pico de 64 [RPM] y por la forma de la señal se puede observar su auto arranque ya que viene de velocidad 0 de forma ascendente hasta llegar al valor pico.

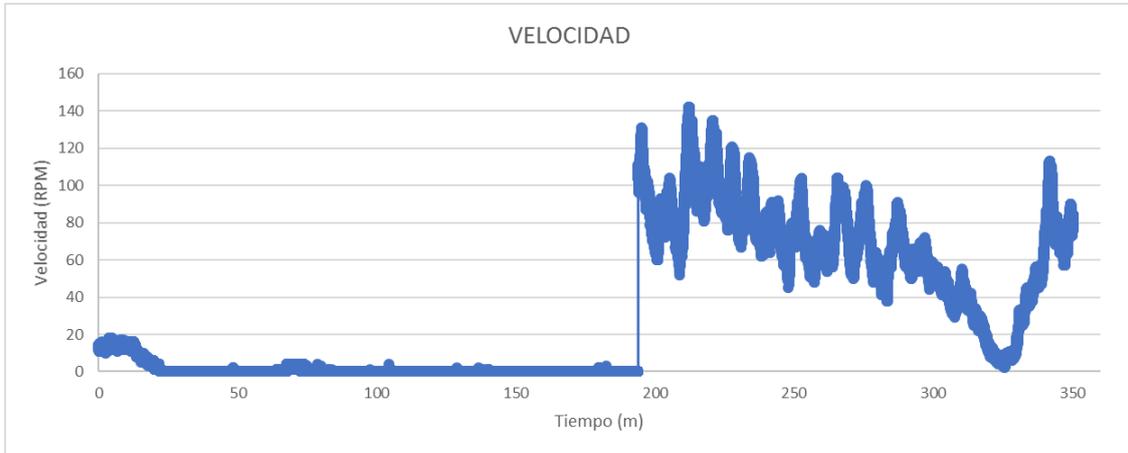


Figura 89. Gráfica de velocidad del aerogenerador etapa 2.1 [AUTOR]

En la gráfica de la figura 89 la velocidad del aerogenerador se observa que en las primeras tomas que fueron realizadas en horas de la mañana la velocidad fue baja y en ocasiones nula. Vialmente esto se veía reflejado en pequeños intentos del aerogenerador por romper la inercia razón por la cual el encoder recibía pulsos que eran convertidos en velocidad en la etapa de procesamiento. El cambio abrupto se debe a que durante las pruebas se presentó un corte de energía lo cual imposibilitó en esta prueba visualizar el paso de la fase estable a fase de arranque, por las fluctuaciones no se logró llegar a la etapa estable.

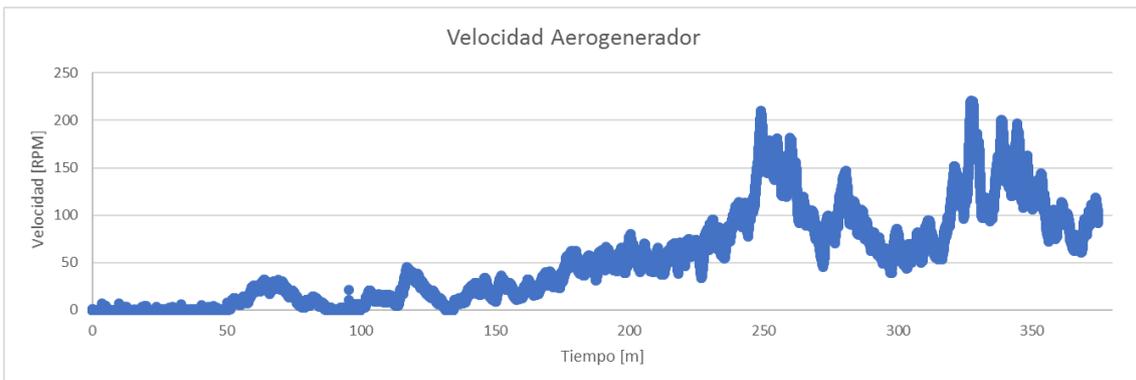


Figura 90. Gráfica de velocidad del aerogenerador etapa 2.2 [AUTOR]

En esta gráfica se logra visualizar correctamente el cambio de fases de estable a arranque del sistema. Datos que corresponden de 11 am a 4 pm donde se presentan velocidades altas que luego de un posterior cálculo se podrá determinar si cumplen con la potencia requerida para su funcionamiento.

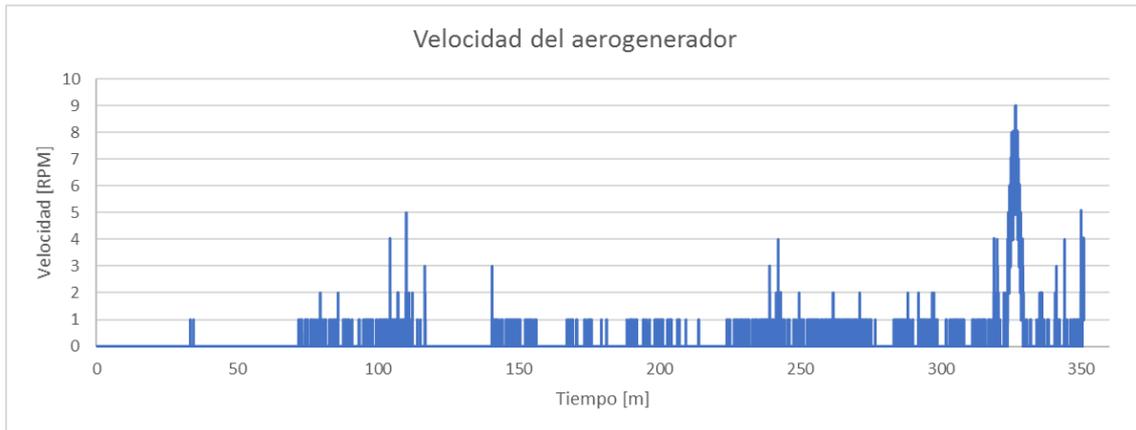


Figura 91. Gráfica de velocidad del aerogenerador en la noche etapa 2.2 [AUTOR]

Esta grafica representa los datos tomados durante la noche lo cual se ve reflejado en velocidades muy bajas que para el aerogenerador no representa ninguna condición favorable lo que corrobora lo visto durante las pruebas realizadas y resultados obtenidos que nos indica que las mejores horas del día para el aprovechamiento de la energía del viento es entre las 11 am y las 4 pm.

11.4. POTENCIA MECÁNICA

Con la información de velocidad en rpm registrada anteriormente se realiza la conversión a rad/s.

$$v_{(rad/s)} = \frac{v_{(rpm)} * 2 * \pi}{60s}$$

Por definición la aceleración angular es la derivada de la velocidad por lo que usamos la ecuación de la recta para calcularla.

$$a = \frac{(v_2 - v_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Por medio de SolidWorks hallamos la inercia del aerogenerador [Ver anexo E] que es 11.78 [Kg.m²]. Con estos datos podemos calcular el torque neto que es.

$$T = I * \alpha$$

Calculamos la potencia mecánica instantánea multiplicando el torque por la velocidad angular.

$$P = T * v_{(rad/s)}$$

Debido a la cantidad de datos tomados a continuación se tabula un muestra de los datos el procedimiento anteriormente explicado

TIEMPO (ms)	VELOCIDAD (RPM)	VELOCIDAD ANGULAR (Rad/s)	ACELERACION ANGULAR PENDIENTE	INERCIA (Kg.m ²)	TORQUE NETO (Kg.m ² /s ²)	POTENCIA MECANICA (W)
T: 180.52	v: 50	5.235987756	5	11.78	58.9	308.399679
T: 180.52	v: 51	5.340707511	10		117.8	629.135345
T: 180.52	v: 51	5.340707511	15		176.7	943.703017
T: 180.52	v: 53	5.550147021	5		58.9	326.90366
T: 180.52	v: 54	5.654866776	5		58.9	333.071653
T: 180.53	v: 52	5.445427266	5		58.9	320.735666
T: 180.53	v: 53	5.550147021	15		176.7	980.710979
T: 180.53	v: 53	5.550147021	10		117.8	653.807319
T: 180.53	v: 50	5.235987756	30		353.4	1850.39807
T: 180.53	v: 51	5.340707511	15		176.7	943.703017
T: 180.53	v: 56	5.864306287	20		235.6	1381.63056
T: 180.54	v: 54	5.654866776	10		117.8	666.143306

Tabla 11.4.1. Muestra de procesamiento de datos tomados

Los datos consignado en la tabla 11.4.1 corresponden al tiempo desde que se inició la medición en el Arduino, la velocidad sensada por el encoder, con estos datos la se calcula la velocidad angular y la aceleración angular que debido al período de muestreo

del Arduino respecto a la señal del encoder presenta dichas variaciones las cuales tiene relación directa con el torque y la potencia final calculada para cada instante de tiempo.

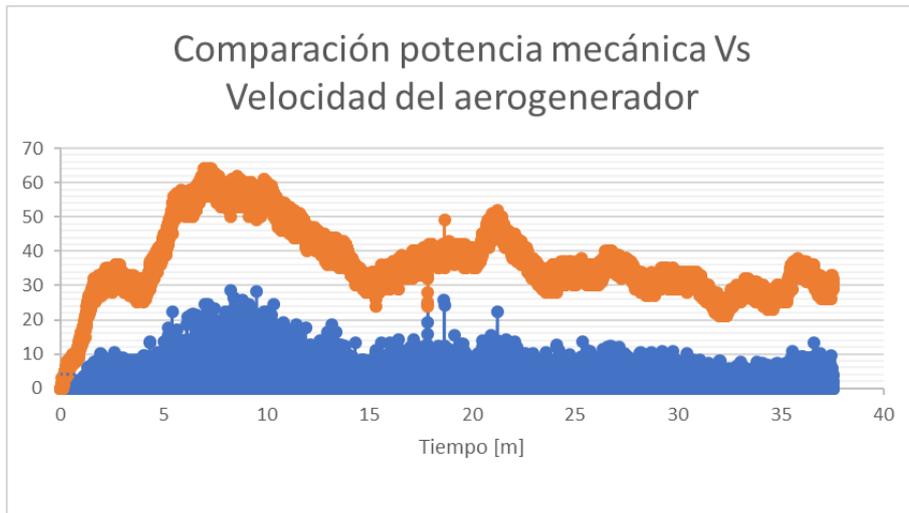


Figura 92. Comparativa Potencia Vs Velocidad etapa 1^[AUTOR]

Se realizaron 2 tomas de datos en periodos de tiempo diferentes. En la figura 90 se muestra la primera toma, se realiza la comparación entre velocidad (color naranja) y potencia mecánica (color azul) generada en el eje. Debido a que la potencia es considerablemente mayor a la velocidad de giro, dicha señal esta reducida a 100 veces su valor real. La grafica nos muestra una velocidad pico de 64 [RPM]

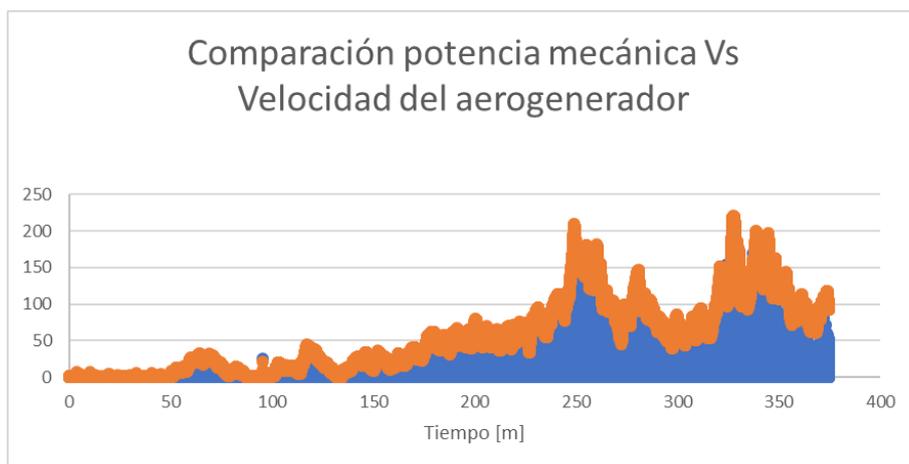


Figura 93. Comparativa Potencia Vs Velocidad etapa 2^[AUTOR]

Al igual que la figura 92 se puede visualizar la comparativa entre la potencia mecánica (color azul) y la velocidad del aerogenerador (color naranja). Para esta segunda toma de datos las condiciones climáticas estuvieron y se ve reflejado en la magnitud de la velocidad y por consiguiente la potencia generada para esta toma de datos fue mucho mayor. Para esta muestra tenemos un promedio de velocidad de 63 [RPM] y de potencia de 480 [W], los valores de velocidad menores a 10 fueron despreciados para estos cálculos ya que siguiendo la secuencia de datos reflejaban un intento de arranque del aerogenerador mas no una descripción de su movimiento y/o velocidad.

12. PRESUPUESTO

Ítem	Referencia	Cantidad	Precio	Total
Alabes	N/A	3	\$ 606,667	\$ 1,820,000
Discos	N/A	2	\$ 600,000	\$ 1,200,000
Estrellas	N/A	2	\$ 200,000	\$ 400,000
Brazos de soporte	N/A	3	\$ 23,000	\$ 69,000
Eje	N/A	1	\$ 300,000	\$ 300,000
Chumacera	SKF	1	\$ 250,000	\$ 250,000
Estructura de soporte	N/A	1	\$ 400,000	\$ 400,000
Soporte Alabes	N/A	3	\$ 50,000	\$ 150,000
Soporte Estrella - Eje	N/A	1	\$ 80,000	\$ 80,000
Carga	N/A	1	\$ 300,000	\$ 300,000
Materiales varios	N/A	N/A	\$ 200,000	\$ 200,000
				\$ 5,169,000

Tabla 12.1. Presupuesto del aerogenerador

13. CONCLUSIONES

- Se observa que la potencia mecánica instantánea experimental dependiendo de su velocidad angular y su aceleración satisfice la condición de generación de potencia ≥ 300 [W] lo que corrobora la selección de la geometría de la etapa impulsora y que durante la validación se presentó un correcto funcionamiento soportado por los resultados obtenidos.
- Las fluctuaciones en los datos obtenidos experimentalmente que podrían pasar de 3 [m/s] a 6 [m/s] en un instante de tiempo muy corto como se observa en la figuras 79,80,81,82, se deben a que las pruebas se realizaron en un ambiente real (Mesa de los Santos), el viento como entrada del sistema presentó dicho comportamiento cambiante, que en promedio para los días monitoreados oscilaba entre los 5 [m/s] y 6 [m/s] en condiciones normales incidiendo directamente en la velocidad el aerogenerador.
- De la etapa de simulación fluido estructura, teniendo en cuenta el refinamiento de malla y la independencia de malla realizada, las condiciones de frontera y el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ que describe flujos laminares, turbulentos y transicionales, en SolidWorks se observó una coincidencia con los resultados experimentales lo que valida los criterios mostrados en el desarrollo de la tesis, a su vez en la selección del dominio de simulación ya que s permite ver la estela del fluido al interactuar con el aerogenerador.

- En los análisis estáticos, los factores de seguridad fueron superiores a uno, lo que garantiza la resistencia ante las diferentes cargas de los materiales. En algunos casos como el del soporte alabe, el factor de seguridad es 693, muy superior a los al estándar en ingeniería, pero que indica que la carga a soportar por el elemento es muy baja con relación a su resistencia por lo que se recomienda el uso del criterio de falla estática.
- Se puede inferir que se obtuvieron resultados de resistencia a la fatiga favorables ya que, para los casos estudiados, el cálculo de vida supera el millón de ciclos, resultado que tiene relación con el análisis estático y sus factores de seguridad por lo que se deduce que el aerogenerador tiene un diseño seguro.
- Factores como la incidencia de la luz para la medición en tiempo real de la velocidad de aerogenerador mediante el fototacómetro y la variación en la dirección del viento afectan la medición por lo que, para el primer caso se realizó una calibración en un ambiente controlado del sensor y para el segundo, basado en la dirección sensada por la estación meteorológica realizar la ubicación precisa del anemómetro para la mayor captación de viento.
- Durante la validación experimental el aerogenerador mostró un correcto funcionamiento respondiendo de forma adecuada a las variaciones del viento, es decir ante un aumento del viento existe un aumento de velocidad en el aerogenerador, alcanzando velocidades hasta de 221 [RPM] y potencias de 1200 [W], además de cumplir con la condición de auto arranque, característica principal del perfil alar DU-06-W-200.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1].Antezana, J. (2004). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje*. Proyecto de grado. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- [2].Arbeloa, L. Zurita, J. (2012). *Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo savonius para electrificación rural*. Proyecto de grado. Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España.
- [3].Banco mundial. (2017). *Declaración del Grupo Banco Mundial: Nuestro compromiso de acción frente al cambio climático*. Obtenido de la web el día 02 de Noviembre de 2017. URL: <http://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2017/06/01/world-bank-group-statement-our-commitment-to-action-on-climate-change>
- [4].Espitia, C. Puerto, L. (2014). *Diseño y construcción de un mini aerogenerador de eje vertical*. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
- [5].Fundación Natura. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. WWF Colombia. (2016). *El acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Obtenido de la web el día 02 de Noviembre de 2017. URL: http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_1_a_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf
- [6].Gobernación de Santander. *Proyecto Parque Eólico y Solar en la mesa de los Santos en Santander*. (2017). Obtenido de la web el día 02 de Noviembre de 2017. URL: <http://www.santanderinnova.org.co/media/21ce381e23c8f957123b482b1ad7d9e7.pdf>
- [7].Lima, F. Orellana, F. Boanerce, E. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo de aerogenerador de baja potencia*. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad del Salvador.

- [8]. Organización Latinoamericana de Energía. *Observatorio de Energías Renovables de América Latina y el Caribe*. (2011). Obtenido de la web el día 02 de Noviembre de 2017. URL: http://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/Colombia_Productos_1_y_2_Esp_02.pdf
- [9]. Shahariar, G. Rashedul, M. *Design and construction of a vertical axis wind turbine*. 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Cox Bazar, Bangladesh.
- [10]. Unidad Nations Climate Change. *Acuerdo de París*. (2015). Obtenido de la web el día 02 de Noviembre de 2017. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish.pdf
- [11]. Universidad de Cartagena. *Estudio y Evaluación del Recurso Eólico en Colombia para su Aprovechamiento como Fuente de Energía Eléctrica*. Obtenido de la web el día 02 de Noviembre de 2017. URL: <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/57/1/ESTUDIO%20Y%20EVALUACION%20DEL%20RECURSO%20EOLICO%20EN%20COLOMBIA%20PARA%20SU%20APROVECHAMIENTO%20COMO%20FUENTE%20DE%20ENERGIA.pdf>
- [12]. The Renewable Energy Website. *Savonius Wind Turbines*. Obtenido de la web el día 28 de Febrero de 2018. URL: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/>
- [13]. BOSH R.; “*Manual de la técnica del automóvil*” 4ta edición. (2006) Pag. 108 -113.
- [14]. Comisión económica para América Latina y el Caribe. *Desarrollo económico local descentralizado en América Latina: Análisis comparativo*. (2002).
- [15]. World Economic Forum. The Global Risk Report. *Partnering for Sustainable Energy Innovation*. (2017)
- [16]. Fundación la Purnia Campesina. *Tejiendo la memoria*. Fundación Suramericana (2008).
- [17]. Universidad Nacional Autónoma de México. *Diseño de un Microgenerador de Eje Vertical*. Sandra Laura Chávez Velázquez. (2010).
- [18]. Universidad Militar Nueva Granada. *Diseño y Construcción de un Mini Aerogenerador de Eje Vertical*. Carolina Espitia, Liliana Puerto. (2014).

- [19]. Universidad de El Salvador. Escuela de Ingeniería Mecánica. *Diseño y Construcción de un Prototipo Aerogenerador de Baja Potencia*. Fernando Lima, Fermín Orellana. (2017)
- [20]. Universidad de Dayton, Pearson Education. *Mecánica de fluidos*. Sexta edición. Robert L. Mott. (2006)
- [21]. Revista Visión Electrónica. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. *Influencia del tipo de alabe en el desempeño hidrodinámico de una turbina tipo Darrieus*. Diana P. Meneses M, Omar D. López S, Santiago Laín B. (2013)
- [22]. Alternative Energies, Advanced Structured Materials 34. Springer-Verlag Berling Heidelberg. *Design Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine with CFD*. D. Meneses. Omar López. S. Laín. (2013)
- [23]. *Computational Study of the Interaction Between Hydrodynamics and Rigid Body Dynamics of a Darrieus Type H Turbine*. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Diana P. Meneses M, Omar D. López S, Santiago Laín B. (2015).
- [24]. *Diseño Estructural De Una Turbina De Eje Vertical Para Aplicaciones Urbanas*. Universidad de Chile. Pablo Ignacio Apaoblaza Augsburg. (2014).
- [25]. ANSYS. Consorci de Serveis Universitaris de Catalunya. Obtenido de la web el día 18 de Marzo de 2018. URL: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/>
- [26]. *The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbine*. Delft University of Technology. M.C. Claessens. (2006).
- [27]. Direct Industry. Software de modelización de CFD Industrial ANSYS Fluent. Obtenido de la web el día 19 de Marzo de 2018. URL: <http://www.directindustry.es/prod/ansys/product-9123-371824.html>
- [28]. *Selección de perfil hidrodinámico para la construcción de un modelo a escala de una microturbina hidrocínética*. Meana Fernández. Universidad de Oviedo. (2017).
- [29]. Universidad Industrial de Santander. *Análisis aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD*, L. F. García Rodríguez. (2014).
- [30]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 138. *The Physics of H-Darrieus Turbine Starting Behavior*. S. Worasinchai, G. Ingram y R. Dominy. (2016).

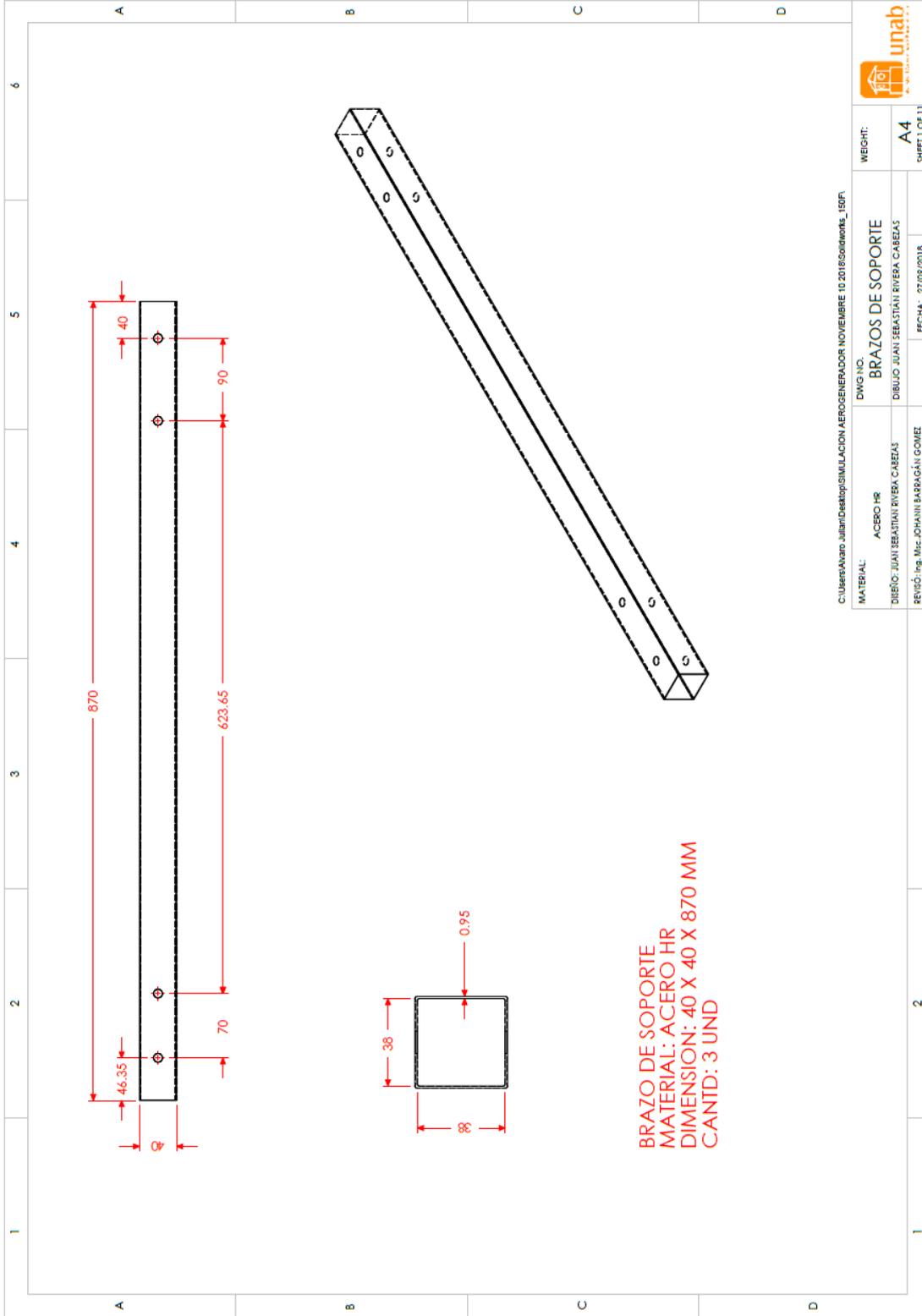
- [31]. *How to build a PMA Permanent Magnet Alternator Generator For Wind Turbines*. WindGenKits. Obtenido de la web el día 30 de Marzo de 2018. URL: <https://www.windgenkits.com/pages/test-page-with-tech-stuff>
- [32]. Chelmsford Weather From CM2Weather. Obtenido de la web el día 31 de Marzo de 2018. URL: <https://www.cm2weather.co.uk/about>
- [33]. *Aerodynamic Analysis and Experimental Test For 4 Bladed Vertical Axis Wind-Turbine Using Large-Eddy Simulation (LES) Turbulence Model*. School of Aerospace Engineering, Department. of Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. G.J. Ryu, D.H. Kim, H.H. Choo, J.P. Shim. (2012).
- [34]. AFAX Wind Power System. *Introducing The First Self Adapting Aerodynamic Surface*. Obtenido de la web el día 31 de Marzo de 2018. URL: http://www.af-ax.com/?page_id=2974
- [35]. New Atlas. *DARWIND5 Wind turbine improves on an old design*. Antonio Pasolini. Obtenido de la web el día 31 de Marzo de 2018. URL: <https://newatlas.com/darwind5-vertical-axis-wind-turbine/24696/>
- [36]. Journal of Engineering and Applied Sciences. *Proposed Design of Wind Turbine Systems on a Pickup Truck*. Sofian Mohd, Nurhayati Rosly, Mohd Fadhli, Aslam Abdullah. (2016).
- [37]. Universidad Autónoma de Bucaramanga. *Diseño y Simulación de un Aerogenerador de Eje Vertical Para Zonas no Interconectadas de Colombia*. Johann Barragán Gómez, Yecid Alfonso Muñoz Maldonado. (2017).
- [38]. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander. 12° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. *Modelado Numérico Del Perfil de los Alabes De Una VAWT*. Jaramillo Ibarra J. E., García Rodríguez L. F., Chacón Velazco J. L. (2015).
- [39]. Anemómetro.top. *Anemómetro digital UNI-T UT363*. Obtenido de la web el día 20 de diciembre de 2018. URL: <https://anemometro.top/uni-t-ut363/>
- [40]. Ipower electrónica y servicios. *Encoder LPD3806-600BM*. Obtenido de la web el día 20 de diciembre de 2018. URL: <http://ipowerelectronics.com/motor-dc/1841-encoder-rle3806-ab-600n.html>
- [41]. Arduino. *Arduino mega 2560*. Obtenido de la web el día 20 de diciembre de 2018. URL: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- [42]. Aquaminer Soluciones S.A.S. *Tomografía eléctrica para evaluar el potencial hídrico subterráneo de la granja la esperanza mesa de los santos, Santander*. José Marco Orozco Pérez. (2017)

- [43]. Universidad Autónoma de Bucaramanga. (UNAB). *Sistema de monitoreo en tiempo real para determinar la concentración de fenol diluido en agua destilada*. Gilmar Hernando Tuta Navajas, Katherin Gutiérrez Ávila. (2016)

ANEXOS

ANEXO A PLANOS

Plano 1



**BRAZO DE SOPORTE
MATERIAL: ACERO HR
DIMENSION: 40 X 40 X 870 MM
CANTD: 3 UND**

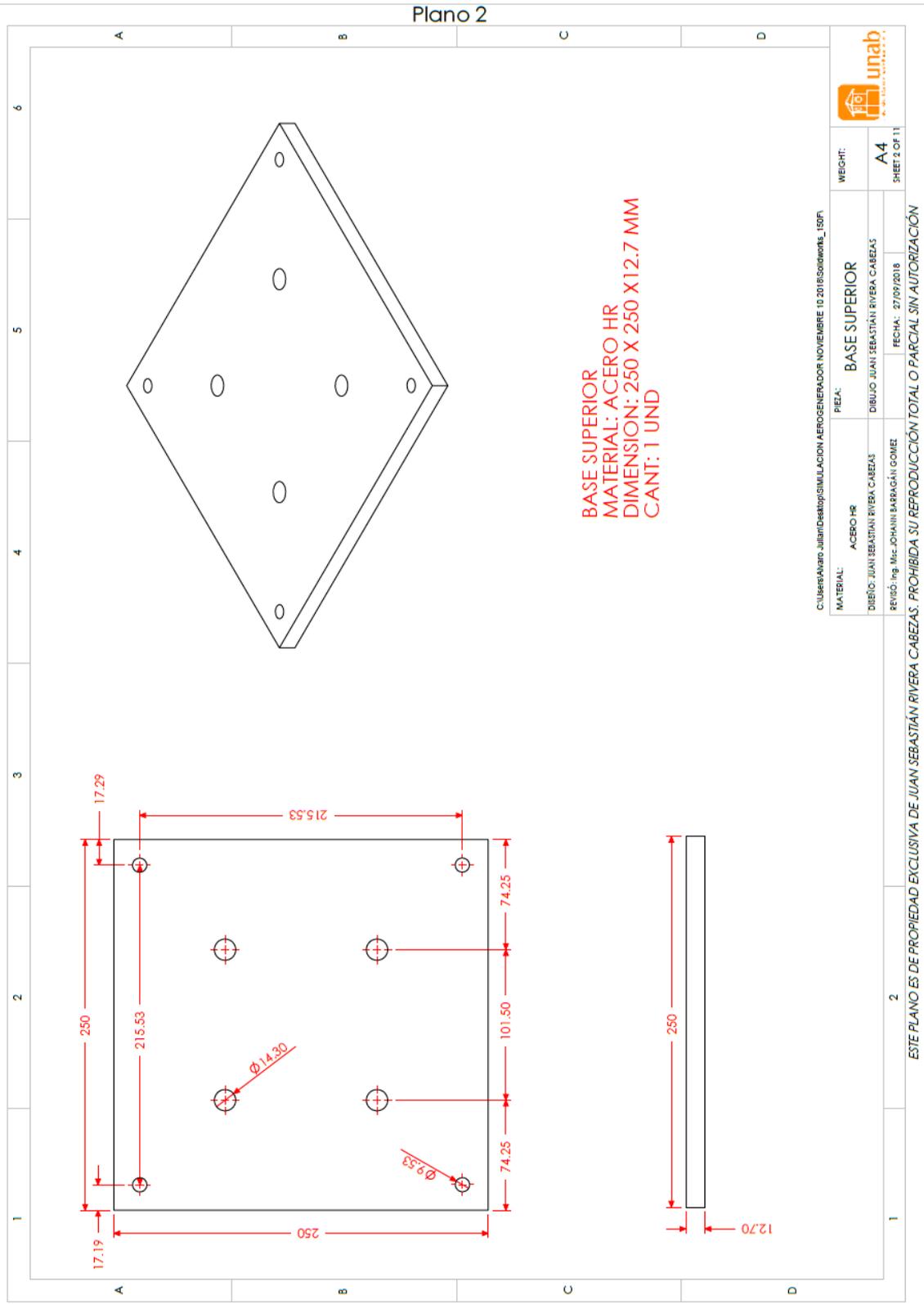
C:\Users\Aviano.Julian\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2016\800mmx0m5_150F

MATERIAL:	ACERO HR	DWG NO.:	BRAZOS DE SOPORTE	WEIGHT:	
DISÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	SHEET:	A4
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHANNI BARRAGÁN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018	SHEET OF 11	



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 2



BASE SUPERIOR
 MATERIAL: ACERO HR
 DIMENSION: 250 X 250 X 12.7 MM
 CANT: 1 UND

C:\Users\Aviano\Juan\Desig\Simulacion AeroGenerador\NOVIEMBRE 10 2016\Solidworks_150\F1

MATERIAL:	ACERO HR	PIEZA:	BASE SUPERIOR	WEIGHT:	
DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHANNI BARRAGÁN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018		
				WEIGHT:	A4
					SHEET 2 OF 11

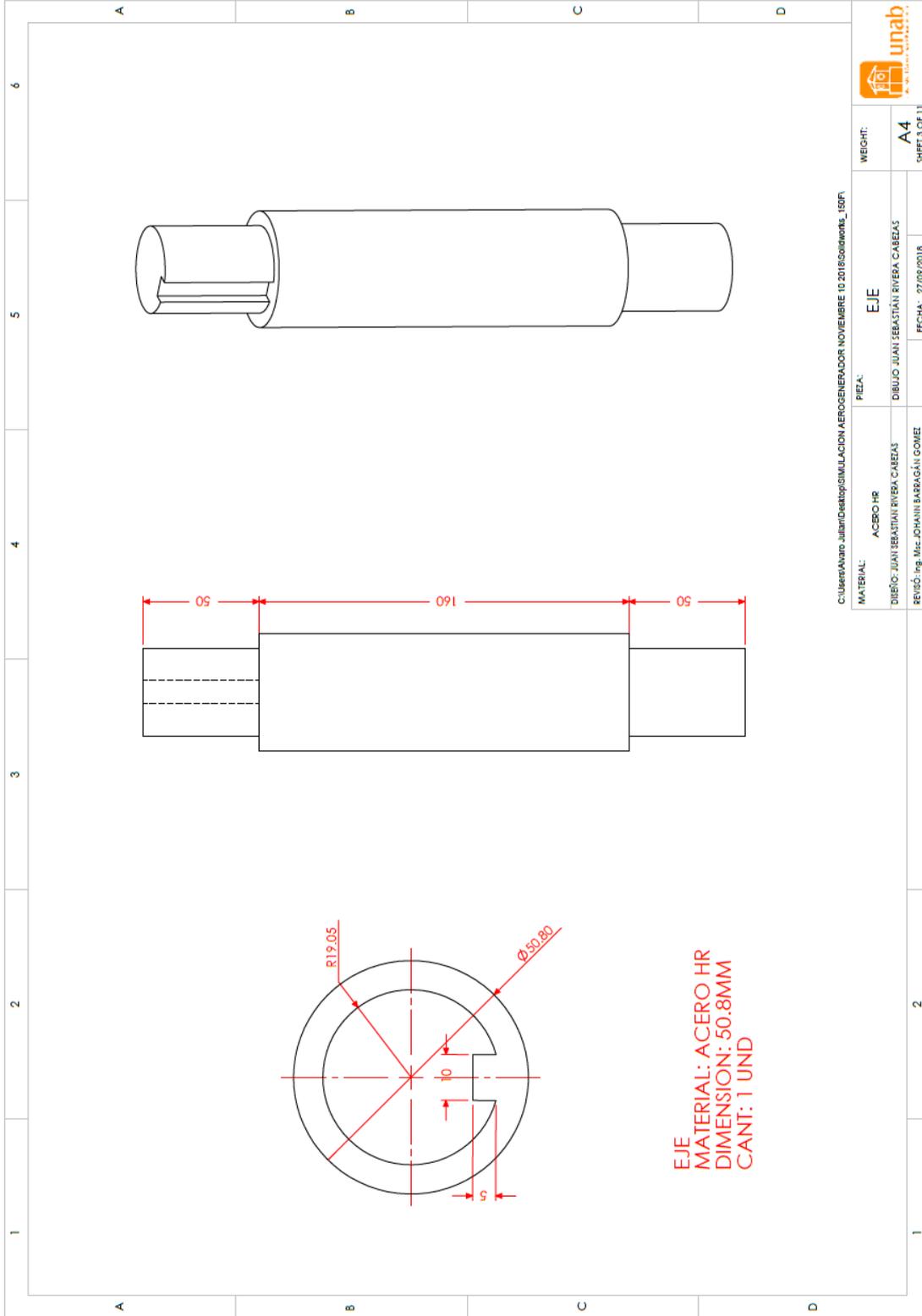


ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

2

1

Plano 3

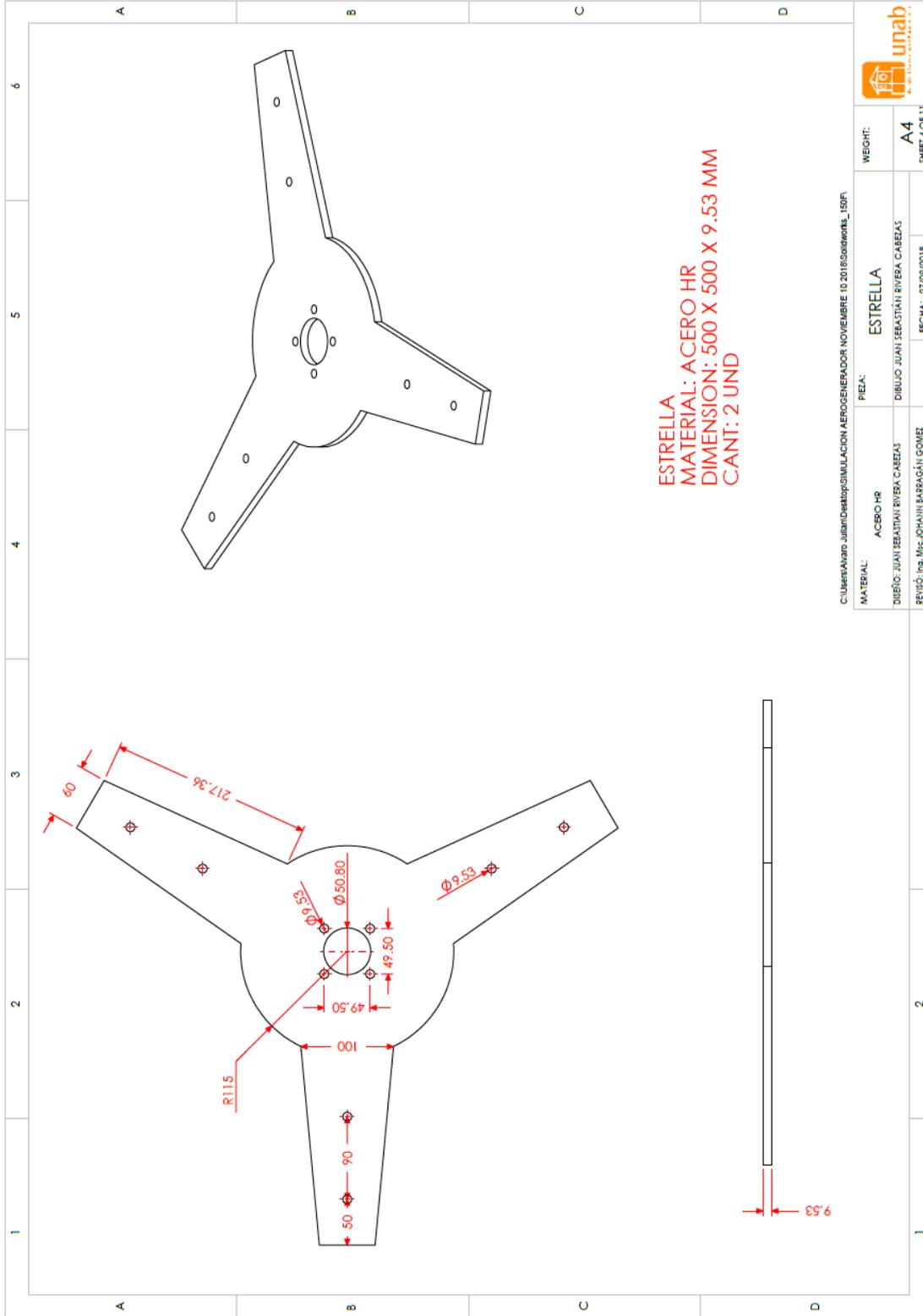


C:\Users\Avano\Juliano\Desig\Simulacion AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2016\Soluciones_1\ISDF

MATERIAL:	ACERO HR	PIEZA:	EJE	WEIGHT:	
DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHNNY BARRAGÁN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018		
				WEIGHT:	A4
					SHEET 3 OF 11

ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

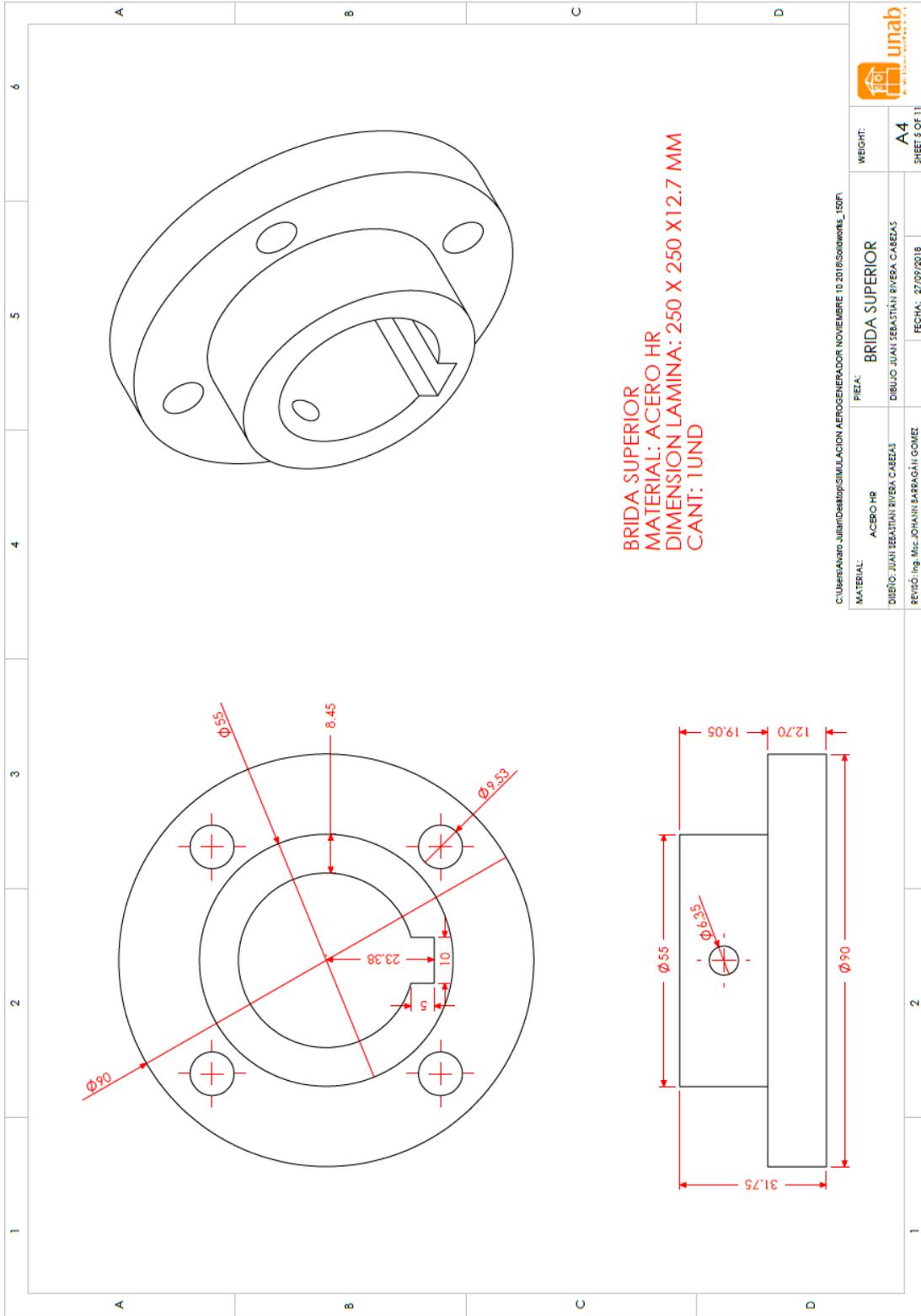
Plano 4



ESTRELLA
MATERIAL: ACERO HR
DIMENSION: 500 X 500 X 9.53 MM
CANT: 2 UND

ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 5



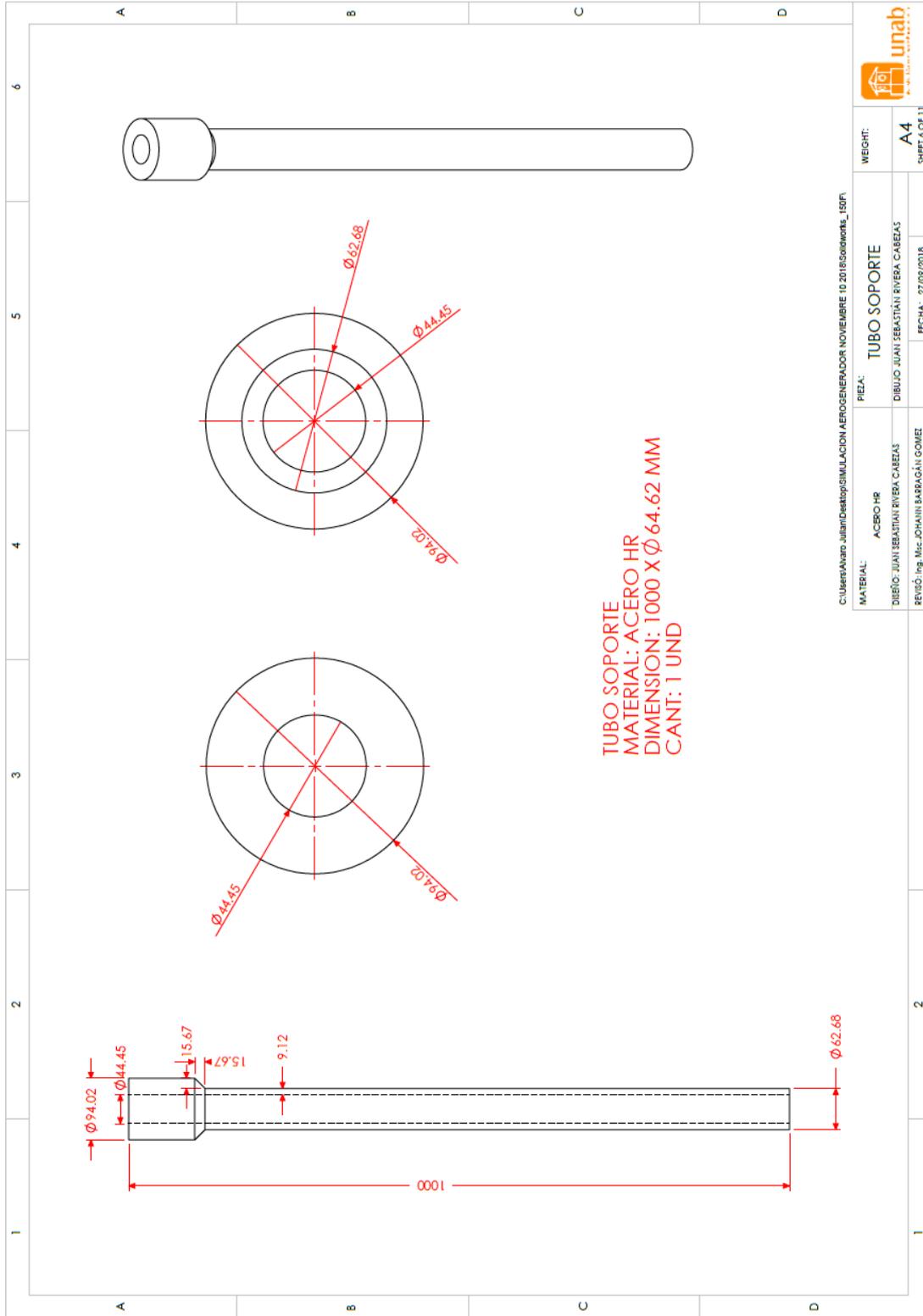
BRIDA SUPERIOR
MATERIAL: ACERO HR
DIMENSION LAMINA: 250 X 250 X12.7 MM
CANT: 1UND

C:\Users\Anaro.Julian\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2016\Solidworks_1\ISDF1

MATERIAL:	ACERO HR	PIEA:	BRIDA SUPERIOR	WEIGHT:	
DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHANNI BARRAGÁN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018		
				WEIGHT:	A4
					SHEET 5 OF 11

ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 6



TUBO SOPORTE
 MATERIAL: ACERO HR
 DIMENSION: 1000 X Ø 64.62 MM
 CANT: 1 UND

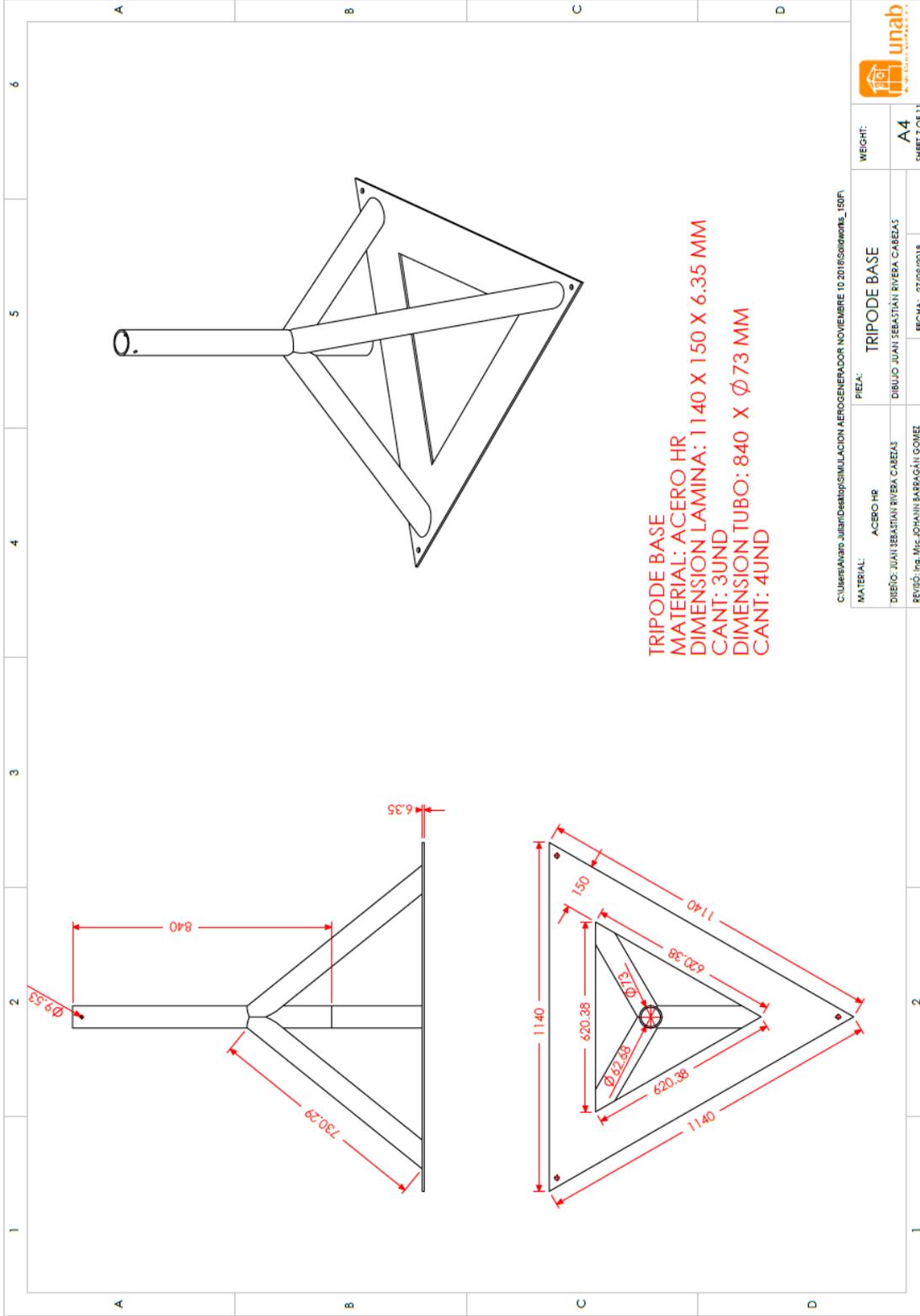
C:\Users\Avaro_Juan\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2018\BOMWORKS_150F1

MATERIAL:	ACERO HR	PIEA:	TUBO SOPORTE	WEIGHT:	
DIBUJO:	JUAN SEBASTIAN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIAN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHANNI BARRAGÁN GÓMEZ	FECHA:	27/09/2018		
					A4
					SHEET 6 OF 11



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 7



TRIPODE BASE
 MATERIAL: ACERO HR
 DIMENSION LAMINA: 1140 X 150 X 6.35 MM
 CANT: 3UND
 DIMENSION TUBO: 840 X Ø73 MM
 CANT: 4UND

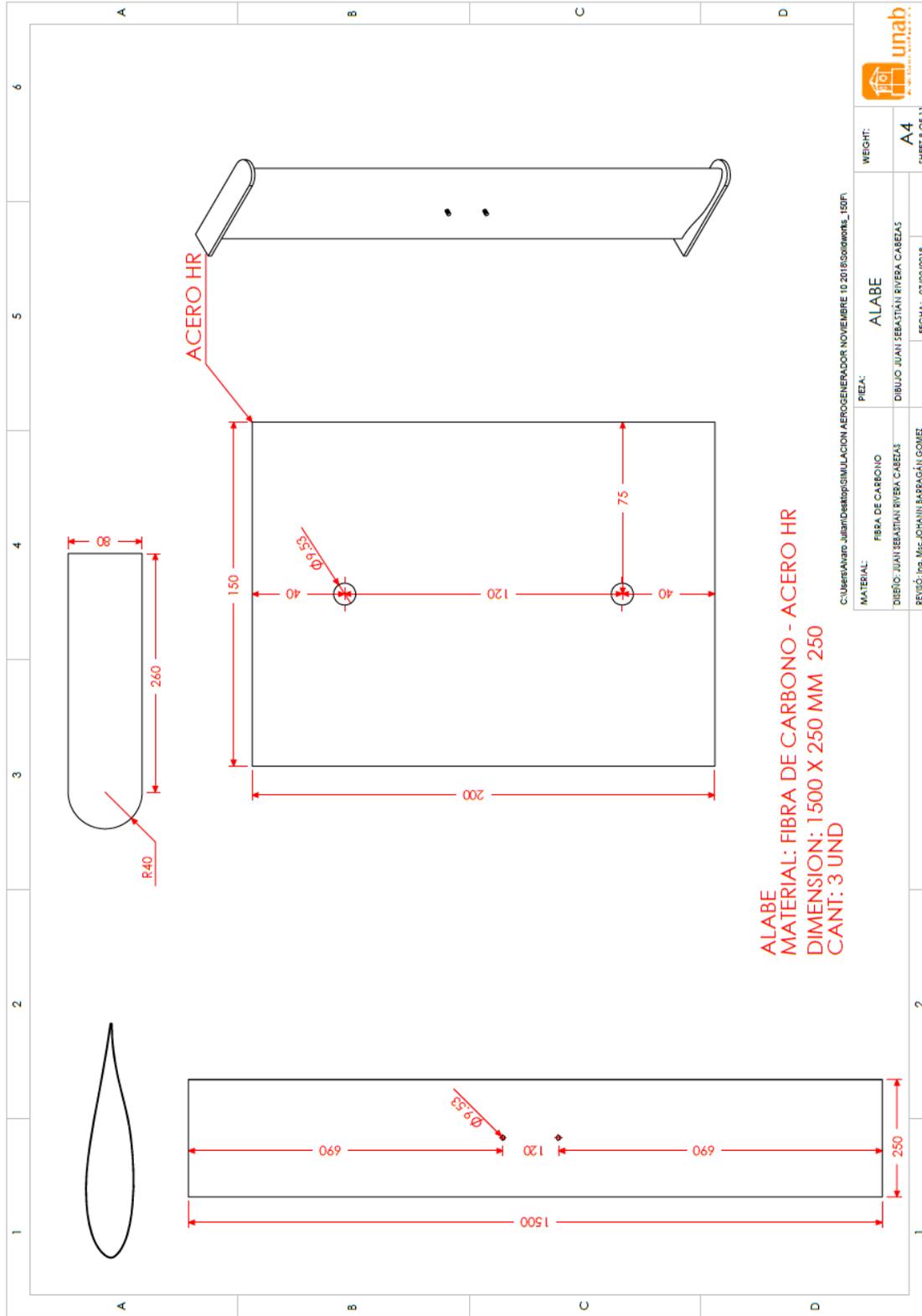
C:\Users\Alan_Julian\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2018\Solidworks_150\F1

MATERIAL:	ACERO HR	PREZA:	TRIPODE BASE	WEIGHT:	
DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHNNY BARRAGÁN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018		
					A4
					SHEET 7 OF 11



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 8



ALABE
 MATERIAL: FIBRA DE CARBONO - ACERO HR
 DIMENSION: 1500 X 250 MM 250
 CANT: 3 UNDS

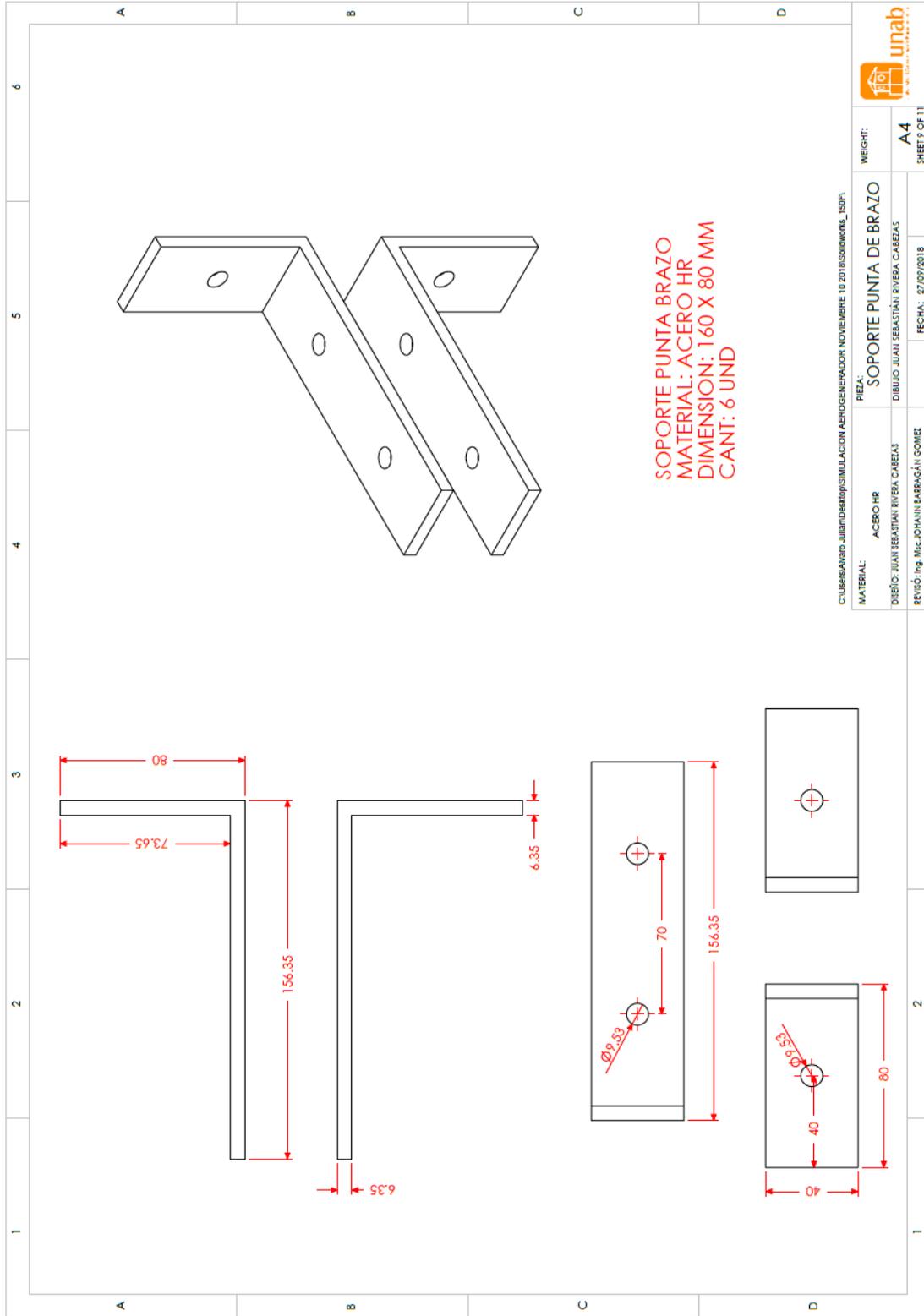
C:\Users\Avaro\Juan\Drawtop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2018\Solidworks_1501

MATERIAL:	FIBRA DE CARBONO	PREZA:	ALABE	WEIGHT:	
DIBUJO:	JUAN SEBASTIAN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIAN RIVERA CABEZAS		
REVISOR:	Msc. JOHANN BARRAGAN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018		
				WEIGHT:	A4
					SHEET 8 OF 11



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIAN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACION

Plano 9



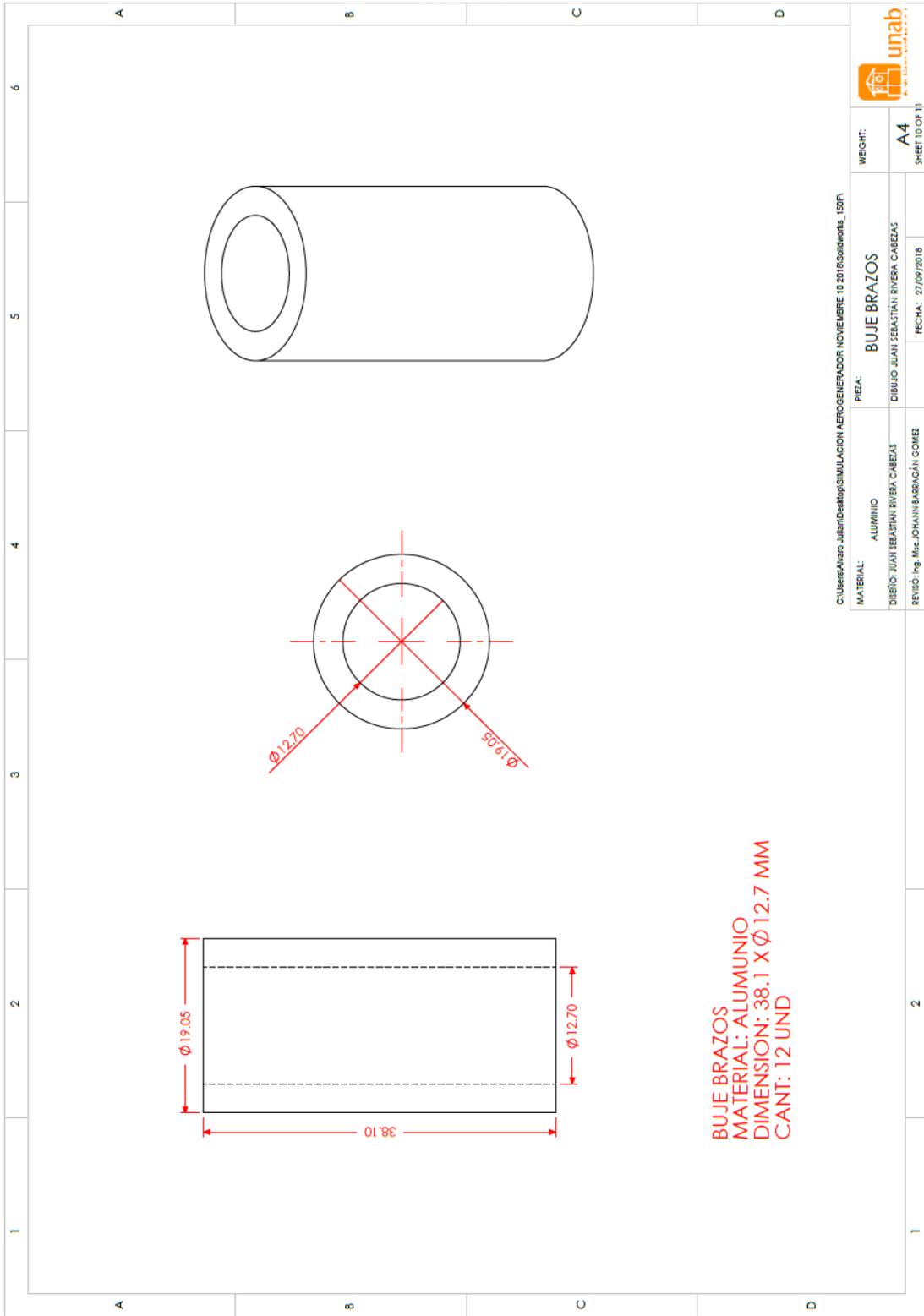
SOPORTE PUNTA BRAZO
 MATERIAL: ACERO HR
 DIMENSION: 160 X 80 MM
 CANT: 6 UND

C:\Users\Avaro\Juan\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2018\Solidworks_150\FI	
MATERIAL:	ACERO HR
DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHANNI BARRAGÁN GOMEZ
PIEZA:	SOPORTE PUNTA DE BRAZO
DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS
FECHA:	27/09/2018
WEIGHT:	A4
	SHEET 9 OF 11



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 10



BUJE BRAZOS
MATERIAL: ALUMINIO
DIMENSION: 38.1 X Ø 12.7 MM
CANT: 12 UND

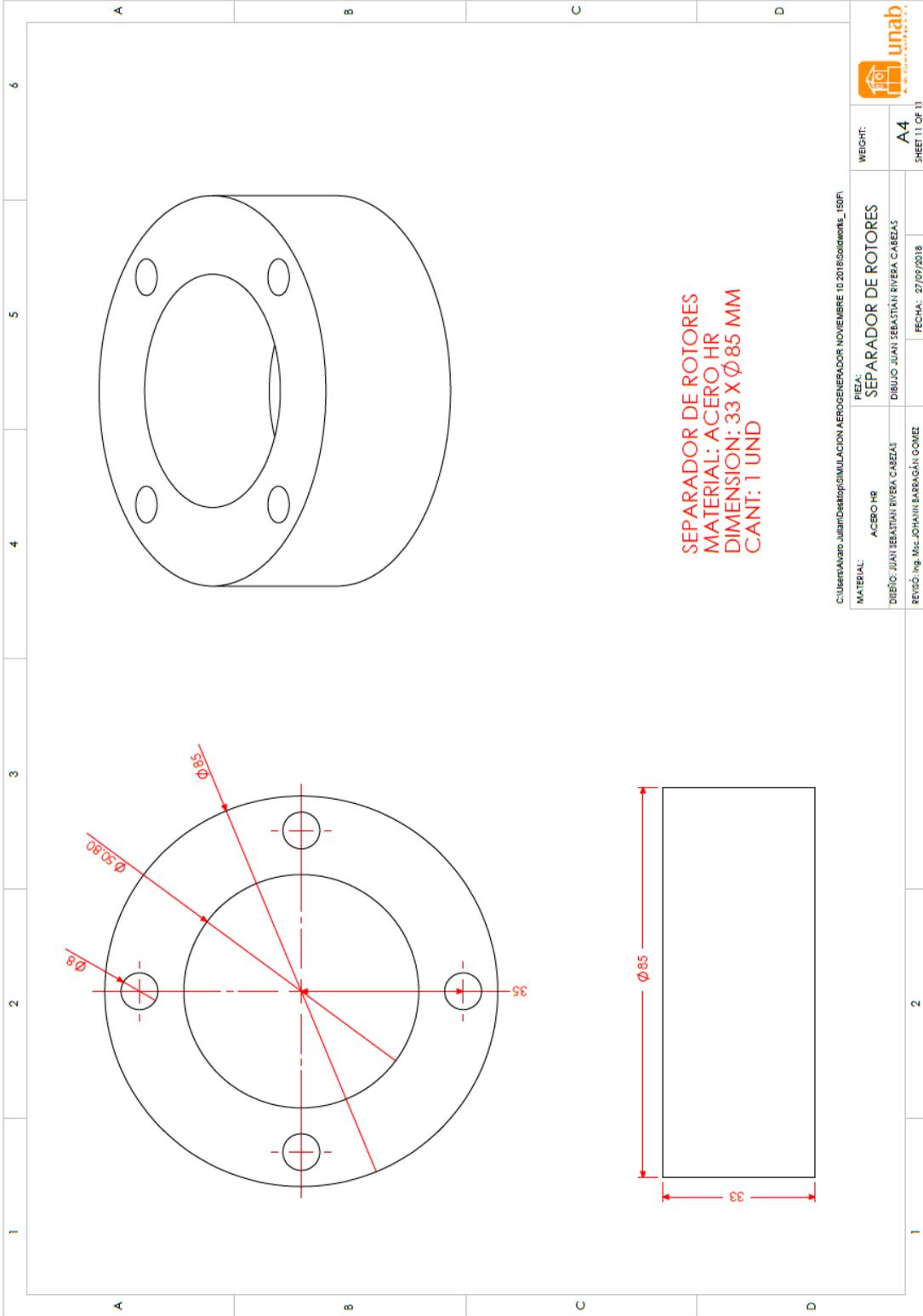
C:\Users\Alvaro_Juan\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2016\Solidworks_150F1

MATERIAL:	ALUMINIO	PIEA:	BUJE BRAZOS	WEIGHT:	
DISEÑO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. MIC-JOHANNI BARRAGÁN GOMEZ	FECHA:	27/09/2018		
					A4
					SHEET 10 OF 11



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

Plano 11



SEPARADOR DE ROTORES
 MATERIAL: ACERO HR
 DIMENSION: 33 X Ø85 MM
 CANT: 1 UND

C:\Users\Aviara_Julian\Desktop\SIMULACION AEROGENERADOR NOVIEMBRE 10 2018\BOM\works_150\F1

MATERIAL:	ACERO HR	PIEZA:	SEPARADOR DE ROTORES	WEIGHT:	
DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS	DIBUJO:	JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS		
REVISÓ:	Ing. Msc. JOHANNI BARRAGÁN GÓMEZ	FECHA:	27/09/2018		
					A4
					SHEET 11 OF 11



ESTE PLANO ES DE PROPIEDAD EXCLUSIVA DE JUAN SEBASTIÁN RIVERA CABEZAS. PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN AUTORIZACIÓN

ANEXO B CONSTRUCCIÓN MOLDE Y PERFIL ALAR

Procedimiento de construcción molde perfil alar en fibra de vidrio

1. Se aplica 4 capas de será para desmoldear fibra de vidrio (sumiglass).
2. Se aplica de 2 a 3 capas de alcohol polivinílico. Se realiza un secado completo antes de aplicar la siguiente capa.
3. Gelcoar 908 azul. Viene mezcla lista (resina).
4. Se aplica un catalizador Ms Mekperóxido a la mezcla de Gelcoar, a mayor cantidad del catalizador menor tiempo de secado de la resina. 1% al 5%.
5. Se aplican dos capas de la mezcla del Gelcoar (resina) y el catalizador. Se realiza un secado completo antes de aplicar la siguiente capa. 30 minutos. Se agiliza el proceso con una pistola de calor.
6. Para evitar burbujas y mejorar el acabado sobre la superficie, al aplicar la resina se puede pasar un rodillo de pasta.
7. Se mezcla resina, talco industrial, cobalto. En el borde de ataque para evitar la porosidad y en los huecos guías. El espesor de la mezcla se define a ojo.
8. Se mezcla resina poliéster al 30% con disolvente y mekperóxido luego se aplica sobre toda la superficie la cual hará la función de pegamento entre el molde base y la fibra de vidrio.
9. Se aplica resina antes de pegar la fibra de vidrio con resistencia en todas las direcciones.
10. Se realiza el paso 8 nuevamente y se pega la fibra de vidrio con resistencia horizontal y vertical y se recubre la superficie con la mezcla del paso 8 cuidadosamente hasta tapar todas las burbujas de aire.
11. Luego se repite el paso 9.
12. A la resina se le aplica disolvente para facilitar la manipulación, en estado puro ofrece mayor resistencia, pero es poco manejable.
13. Para el desmoldeo se debe secar 1 día entero.
14. Con lija 1500, agua y jabón se pule internamente para eliminar imperfecciones que hayan quedado de los pasos anteriores y el secado.
15. Se cortan los bordes con pulidora, se realizan orificios para tornillos de $\frac{1}{4}$ espaciados ± 10 cm.

16. Para un mejor acabado de la superficie se puede pulir con pulimento rosado para vehículo.



Construcción
del molde en el
taller de
manufactura



Procedimiento de construcción perfil alar en fibra de carbono

1. Se aplica cera desmoldante a las 2 caras del molde.
2. Se limpia con un trapo la cera aplicada (3 veces).
3. Se aplica polivinílico para evitar que la fibra se pegue al molde. (3 veces).
4. Se utiliza una pistola de calor para acelerar el proceso de secado para cada capa.



5. Se corta fibra de carbono de 152 cm x 27 cm, la línea de corte se traza con cinta de enmascarar para evitar que la fibra restante se dañe durante el corte que se hace de forma manual con unas tijeras.
6. Se aplica Yelco (resina pura con cobalto) transparente mezclado con catalizador (MekPeróxido) en una relación de 100:5. 100 gramos de resina por 5 gramos de catalizador. (2 capas).
7. La primera capa se deja secar naturalmente, la segunda se puede acelerar el proceso con pistola de calor.
8. Se adhiere una nueva capa de fibra de carbono sin ningún aditivo.
9. Se aplica resina con estireno para cada capa de fibra de carbono.

ANEXO C CÓDIGO DE LECTURA DE VELOCIDAD

```

#include <TimerOne.h>
int velocidad=0;
int counter = 0; //This variable will increase or decrease depending on the rotation of encoder
float s=0;

void setup() {
  Serial.begin (9600);
  Timer1.initialize(100000);
  Timer1.attachInterrupt(ISR_Blink);
  pinMode(2, INPUT);          // set pin to input
  pinMode(3, INPUT);          // set pin to input
  digitalWrite(2, HIGH);      // turn on pullup resistors
  digitalWrite(3, HIGH);      // turn on pullup resistors
  attachInterrupt(0, ai0, RISING);
}

void loop() {
  //Serial.println (counter);
}

void ISR_Blink(){

  noInterrupts();
  velocidad=(counter*60)/(0.1*1050);
  float Tiempo=millis();
  Serial.print("Tiempo: ");
  Serial.print(Tiempo/1000);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("contador: ");
  Serial.print(counter);
  Serial.print(" velocidad: ");
  Serial.println(velocidad);
  counter=0;
  interrupts();
}

void ai0() {
  counter++;
}

```

ANEXO D REPORTES ANEMÓMETRO UNI-T UT363

PRUEBA 1

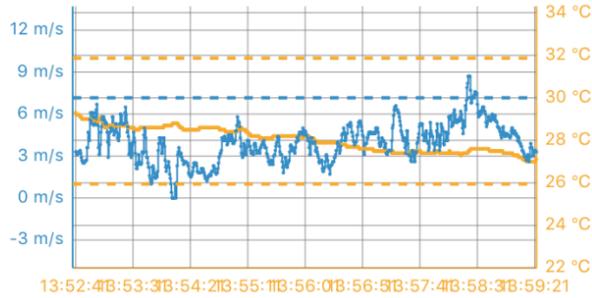
Measurement Report

Customer information

Name:	Add:
Tel:	Email:
Note:	

Measurement data

Device name: UT363BT	Report name: UT363BT20181214135241		
Sampling Time: 0.5s	Recorded Data: 804	Start time: 14 12 2018 13:52:41	End time: 14 12 2018 13:59:23
Max: #Max#	Alarm Max: #alarmMax#	Min: #Min#	Alarm Min: #alarmMin#
Max: 8.7m/s	Alarm Max: 10m/s	Max: 29.3°C	Alarm Max: 30°C
Min: 0.0m/s	Alarm Min: 1m/s	Min: 0.0°C	Alarm Min: 10°C



Company information

Name:	Add:
Fax:	Email:
URL:	
Technician:	Signature:
Tel:	Date: 2018-12-14

PRUEBA 2

Measurement Report

Customer information

Name:	Add:
Tel:	Email:
Note:	

Measurement data

Device name: UT363BT	Report name: UT363BT20181214132424		
Sampling Time: 0.5s	Recorded Data: 1007	Start time: 14 12 2018 13:24:24	End time: 14 12 2018 13:32:47
Max: #Max#	Alarm Max: #alarmMax#	Min: #Min#	Alarm Min: #alarmMin#
Max: 8.2m/s	Alarm Max: 10m/s	Max: 27.1°C	Alarm Max: 30°C
Min: 0.0m/s	Alarm Min: 1m/s	Min: 0.0°C	Alarm Min: 10°C



Company information

Name:	Add:
Fax:	Email:
URL:	
Technician:	Signature:

PRUEBA 3

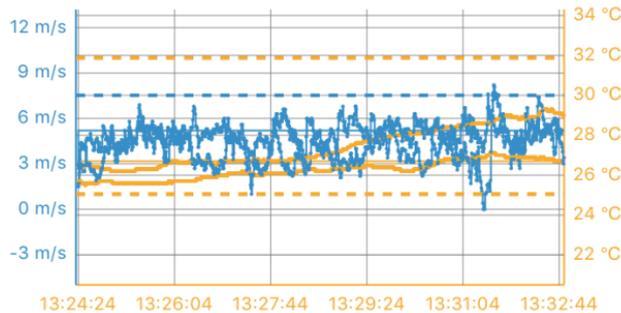
Measurement Report

Customer information

Name:	Add:
Tel:	Email:
Note:	

Measurement data

Device name: UT363BT	Report name: UT363BT20181214133338		
Sampling Time: 0.5s	Recorded Data: 1011	Start time: 14 12 2018 13:33:38	End time: 14 12 2018 13:42:03
Max: #Max#	Alarm Max: #alarmMax#	Min: #Min#	Alarm Min: #alarmMin#
Max: 7.4m/s	Alarm Max: 10m/s	Max: 29.3°C	Alarm Max: 30°C
Min: 0.0m/s	Alarm Min: 1m/s	Min: 0.0°C	Alarm Min: 10°C



Company information

Name:	Add:
Fax:	Email:
URL:	

Technician: _____ Signature: _____

PRUEBA 4

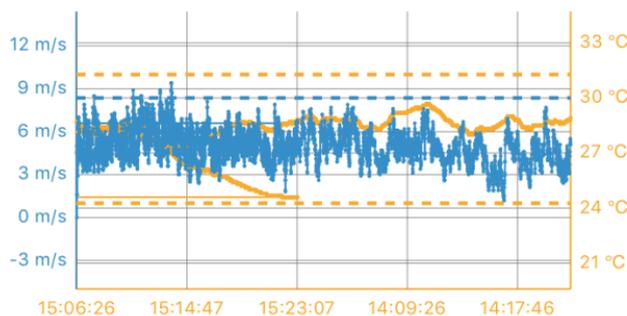
Measurement Report

Customer information

Name:	Add:
Tel:	Email:
Note:	

Measurement data

Device name: UT363BT	Report name: UT363BT20181220140108		
Sampling Time: 0.5s	Recorded Data: 4483	Start time: 20 12 2018 14:01:08	End time: 20 12 2018 14:38:30
Max: #Max#	Alarm Max: #alarmMax#	Min: #Min#	Alarm Min: #alarmMin#
Max: 8.9m/s	Alarm Max: 10m/s	Max: 29.7°C	Alarm Max: 30°C
Min: 0.0m/s	Alarm Min: 1m/s	Min: 0.0°C	Alarm Min: 10°C

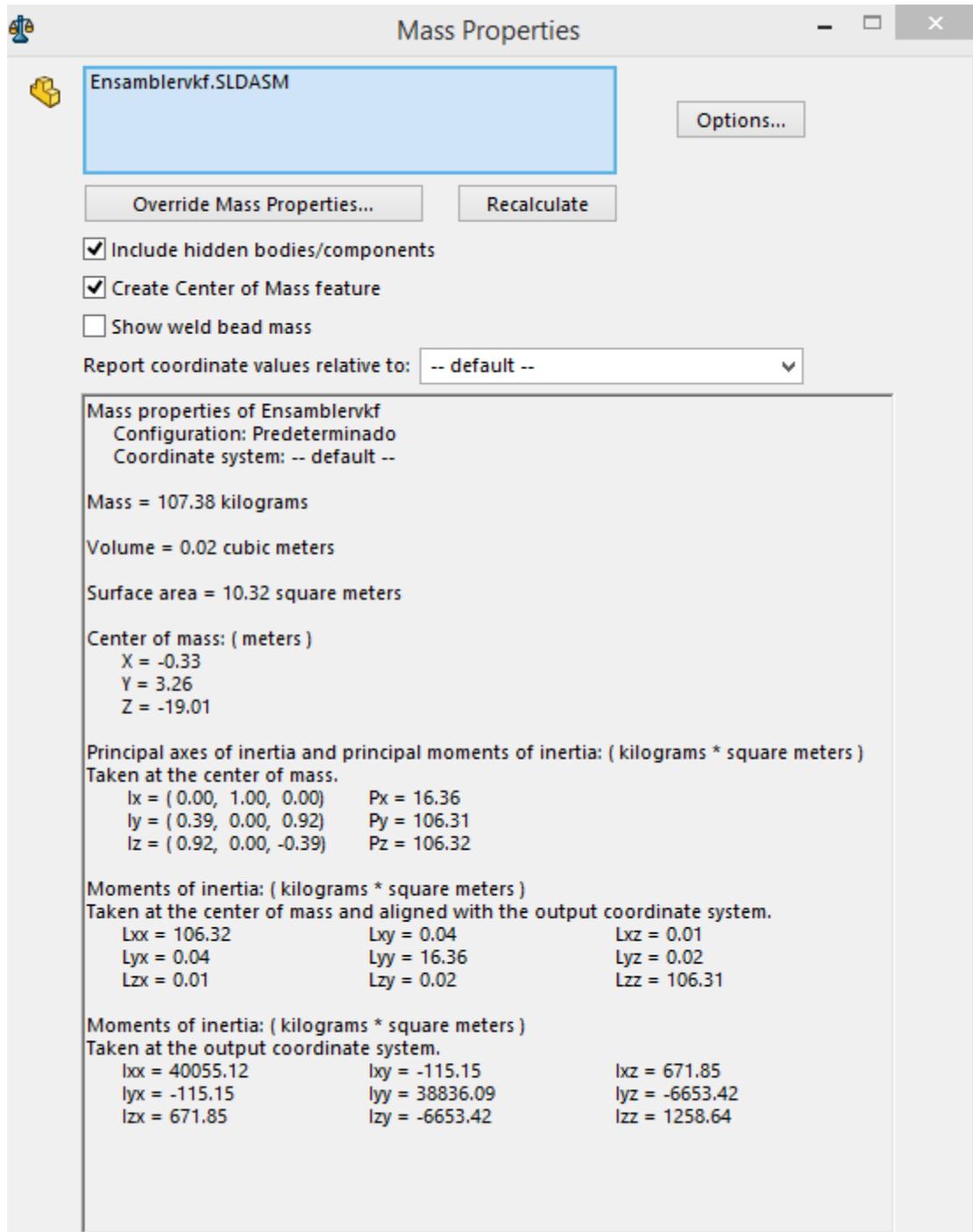


Company information

Name:	Add:
Fax:	Email:
URL:	

Technician: _____ Signature: _____

ANEXO E PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ENSAMBLE



ANEXO F RODAMIENTO YAR 208 – 108 – 2F

SKF Bearing Calculator

Calculation summary report

Published on 2019-01-21 05.27.36 GMT



SKF General Conditions for technical assistance and advice (available at www.skf.com) shall apply to this report.
SKF accepts no variation of any of these conditions unless confirmed in writing by SKF.

® SKF is a registered trademark of the SKF Group.

© SKF Group 2013

The contents of this publication are the copyright of SKF and may not be reproduced, duplicated, copied, transferred, distributed, stored, modified, downloaded or otherwise exploited for any commercial use without the prior written approval of SKF.

Table of Contents
1. Designation: YAR 208-108-2F 1.1 Bearing rating life 1.2 Minimum load 1.3 Viscosity 1.4 Equivalent dynamic bearing load

1. Designation: YAR 208-108-2F Type: Y-bearing

Bearing Data			
d	D	C	C ₀
38.1 mm	80 mm	30.7 kN	19 kN

1.1 Bearing rating life

Input Parameters

F _r Radial load	0.1 kN
F _a Axial load	0.58 kN
n _i Rotational speed of the inner ring	60 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	25 °C
η _c specification method	Cleanliness classification(recommended)
Lubricant type and cleanliness	High cleanliness (sealed bearing)
Grease used in the bearing	VT307
Viscosity at 40 °C	190.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	15.0 mm ² /s

Warning

Criteria for minimum load is not met. Please contact SKF Application Engineering.

Result

L_{10mh} SKF rating life	>1000000 hour
a_{SKF} SKF life modification factor a_{SKF}	50
κ Viscosity ratio	3.05
p Equivalent dynamic bearing load	1.01 kN
η_c Factor for contamination level	0.83
ν_1 Required kinematic viscosity for $\kappa=1$	175.9 mm ² /s
L_{10h} Basic rating life	>1000000 hour
C/P Load ratio	30.4

1.2 Minimum load

Input Parameters

No user input is required.	
----------------------------	--

Result

F_{rm} Minimum radial load	0.31 kN
---------------------------------	---------

1.3 Viscosity

Input Parameters

n_i Rotational speed of the inner ring	60 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	25 °C

Grease used in the bearing	VT307
Viscosity at 40 °C	190.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	15.0 mm ² /s

Result

v Lubricant viscosity at operating temperature	537 mm ² /s
v_1 Required viscosity at operating temperature for $\kappa=1$	175.9 mm ² /s
v_{ref} Required viscosity at 40 °C for $\kappa=1$	76.1 mm ² /s
κ Viscosity ratio	3.05

1.4 Equivalent dynamic bearing load

Input Parameters

F_r Radial load	0.1 kN
F_a Axial load	0.58 kN

Result

p Equivalent dynamic bearing load	1.01 kN
--	---------